



(11)

EP 4 080 747 A1

(12)

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(43) Date de publication:
26.10.2022 Bulletin 2022/43

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):
H02M 1/00 ^(2006.01) **H02M 3/00** ^(2006.01)
H02M 3/158 ^(2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **22168939.1**

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):
H02M 1/0058; H02M 3/01; H02M 3/158;
H02M 1/0025

(22) Date de dépôt: **20.04.2022**

(84) Etats contractants désignés:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR

Etats d'extension désignés:

BA ME

Etats de validation désignés:

KH MA MD TN

(30) Priorité: **21.04.2021** **FR 2104154**

(71) Demandeur: **Commissariat à l'énergie atomique
et aux énergies alternatives
75015 Paris (FR)**

(72) Inventeurs:

- **DESPESSÉ, Ghislain**
38054 GRENOBLE CEDEX 9 (FR)
- **TOUHAMI, Mustapha**
38054 GRENOBLE CEDEX 9 (FR)
- **MOREL, Adrien**
38054 GRENOBLE CEDEX 9 (FR)
- **PILLONNET, Gaël**
38054 GRENOBLE CEDEX 9 (FR)

(74) Mandataire: **Lavoix**
2, place d'Estienne d'Orves
75441 Paris Cedex 09 (FR)

(54) DISPOSITIF ÉLECTRONIQUE ET PROCÉDÉ DE PILOTAGE D'UN CONVERTISSEUR D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE COMPORTANT UN ÉLÉMENT PIÉZOÉLECTRIQUE, SYSTÈME ÉLECTRONIQUE DE CONVERSION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ASSOCIÉ

(57) Ce dispositif électronique (20) de pilotage d'un convertisseur (10), comportant un élément piézoélectrique (15) et plusieurs interrupteurs (K1, K2, K3) commandés pour alterner des phases à tension, et respectivement à charge, sensiblement constante aux bornes (30, 34) dudit élément piézoélectrique, comprend :

- un module (60) de mesure d'une période d'un cycle de résonance de l'élément piézoélectrique ;
- un module (62) de détection d'un événement caractéristique appartenant à un cycle de résonance courant ;
- un module (64) de commande d'une commutation des interrupteurs ; et
- un module (66) de calcul d'au moins trois instants temporels ultérieurs de commutation lors d'au moins un cycle de résonance subséquent, postérieur au cycle courant, chaque instant temporel ultérieur étant calculé à partir d'un événement caractéristique respectif, et le module de commande étant configuré pour commander la commutation de l'interrupteur respectif en chacun des instant temporels ultérieurs calculés.

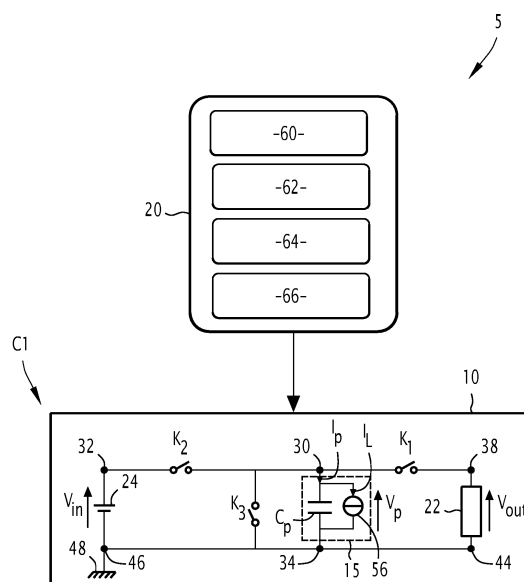


FIG.1

Description

[0001] La présente invention concerne un dispositif électronique de pilotage d'un convertisseur d'énergie électrique, le convertisseur d'énergie électrique comportant un élément piézoélectrique et plusieurs interrupteurs aptes à être commandés pour alterner des phases à tension sensiblement constante aux bornes de l'élément piézoélectrique et des phases à charge sensiblement constante aux bornes dudit élément piézoélectrique.

[0002] L'invention concerne également un système électronique de conversion d'énergie électrique comprenant un tel convertisseur d'énergie électrique et un tel dispositif électronique de pilotage, ainsi qu'un procédé de pilotage d'un tel convertisseur d'énergie électrique.

[0003] L'invention concerne le domaine des systèmes électroniques de conversion d'énergie électrique, en particulier ceux comportant un élément piézoélectrique, notamment des systèmes de conversion en une énergie électrique continue, c'est-à-dire les systèmes de conversion continu-continu, également appelés systèmes de conversion DC-DC (de l'anglais *Direct Current - Direct Current*), et les systèmes de conversion alternatif-continu, également appelés systèmes de conversion AC-DC (de l'anglais *Alternating Current - Direct Current*).

[0004] On connaît des documents FR 3 064 850 B1, FR 3 086 471 A1 et FR 3 086 472 A1, ainsi que du manuscrit de thèse « *Convertisseurs DC-DC piézoélectrique avec stockage provisoire d'énergie sous forme mécanique* » de Benjamin POLLET, un convertisseur d'énergie électrique et un dispositif électronique de pilotage du type précité.

[0005] Dans le manuscrit de thèse précité, le convertisseur d'énergie électrique est typiquement un convertisseur continu-continu comportant un élément piézoélectrique, avec un premier interrupteur reliant une première électrode de l'élément piézoélectrique à une première borne d'application d'une première tension, un deuxième interrupteur reliant ladite première électrode de l'élément piézoélectrique à une première borne de fourniture d'une deuxième tension, et au moins un troisième interrupteur connectant la première électrode à une deuxième électrode de l'élément piézoélectrique, lesdits interrupteurs étant commandés de façon cyclique, à fréquence approximativement constante avec, entre chaque fermeture d'un des interrupteurs, une phase dans laquelle le piézoélectrique est placé dans un circuit électrique ouvert. La fermeture de chaque interrupteur s'effectue sous une tension approximativement nulle à ses bornes. La deuxième électrode de l'élément piézoélectrique est connectée à une deuxième borne d'application de la première tension et à une deuxième borne de fourniture de la deuxième tension.

[0006] En régime établi, un cycle de commande comporte les phases successives suivantes : (I) ouverture du circuit électrique dans lequel est placé le piézoélectrique ; (II) fermeture du premier interrupteur ; (III) ouverture du circuit électrique dans lequel est placé

le piézoélectrique ; (IV) fermeture du troisième interrupteur ; (V) ouverture du circuit électrique dans lequel est placé le piézoélectrique ; et (VI) fermeture du deuxième interrupteur.

[0007] Chaque ouverture du circuit électrique dans lequel est placé le piézoélectrique ou fermeture d'un interrupteur respectif est alors pilotée via la détection d'un événement déclencheur associé à la commutation concernée, puis via l'envoi du signal de commande d'ouverture ou de fermeture à l'interrupteur ou aux interrupteurs correspondants dès la détection dudit événement. L'événement déclencheur associé est par exemple un passage à zéro du courant circulant dans l'élément piézoélectrique, ou encore un passage à une valeur respective de tension sensiblement constante de la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique (ou de la tension entre une borne et un potentiel de référence, par exemple la masse du montage).

[0008] Toutefois, un tel pilotage de ce convertisseur d'énergie électrique n'est pas optimal, notamment pour un fonctionnement du convertisseur à fréquence élevée, tel qu'à une fréquence supérieure à 1 MHz.

[0009] Le but de l'invention est alors de proposer un dispositif électronique, et un procédé associé, de pilotage d'un tel convertisseur d'énergie électrique offrant un pilotage amélioré du convertisseur, notamment à fréquence élevée, typiquement au-delà de 1 MHz.

[0010] A cet effet, l'invention a pour objet un dispositif électronique de pilotage d'un convertisseur d'énergie électrique, le convertisseur comportant un élément piézoélectrique et plusieurs interrupteurs aptes à être commandés pour alterner des phases à tension sensiblement constante aux bornes de l'élément piézoélectrique et des phases à charge sensiblement constante aux bornes dudit élément piézoélectrique, le dispositif électronique de pilotage comprenant :

- un module de mesure configuré pour mesurer une période d'un cycle de résonance de l'élément piézoélectrique ;
- un module de détection configuré pour détecter au moins un événement caractéristique associé au convertisseur d'énergie électrique, l'au moins un événement caractéristique appartenant à un cycle de résonance courant ;
- un module de commande configuré pour commander une commutation de chacun des interrupteurs ; et
- un module de calcul configuré pour calculer au moins trois instants temporels ultérieurs de commutation lors d'au moins un cycle de résonance subséquent, chaque cycle de résonance subséquent étant postérieur au cycle de résonance courant, chaque instant temporel ultérieur de commutation étant calculé à partir d'un événement caractéristique respectif, un premier instant temporel ultérieur correspondant à l'ouverture d'un premier interrupteur, un deuxième instant temporel ultérieur correspondant à la ferme-

ture d'un deuxième interrupteur et un troisième instant temporel ultérieur correspondant à l'ouverture du deuxième interrupteur, et

le module de commande étant configuré pour commander la commutation de l'interrupteur respectif en chacun des instant temporels ultérieurs calculés.

[0011] Avec le dispositif électronique de pilotage selon l'invention, les instants temporels ultérieurs de commutation des interrupteurs sont alors calculés en anticipation pour un ou plusieurs cycles de résonance subséquents, postérieurs au cycle de résonance courant. Cela permet alors d'avoir un fonctionnement correct du convertisseur avec des commutations des interrupteurs aux instants temporels adéquats même pour une fréquence élevée du fonctionnement du convertisseur, telle qu'une fréquence supérieure à 1 MHz, où la fréquence de fonctionnement du convertisseur est égale à l'inverse de la période du cycle de résonance, également appelée période de résonance, c'est-à-dire égale à l'inverse de la durée dudit cycle.

[0012] Avec le dispositif de pilotage de l'état de la technique, des décalages de commutation sont susceptibles d'apparaître progressivement pour un fonctionnement à fréquence élevée. En effet, une comparaison de tension ou de courant prend plusieurs nanosecondes, notées ns, la génération d'un signal de commande à destination du ou des interrupteurs correspondants, tels que des transistors de puissance, requiert également quelques ns à plusieurs dizaines de ns, et le temps d'ouverture ou de fermeture de l'interrupteur en lui-même, tel que le transistor, demande aussi quelques ns. Ainsi, en cumulant ces différentes durées, le pilotage selon l'état de la technique du convertisseur d'énergie électrique dure en soi une à plusieurs dizaines de ns à chaque phase du cycle de commande. Or, pour une fréquence de fonctionnement égal à 10 MHz, la période de résonance dure 100 ns, et chaque phase du cycle de commande dure moins de 50ns. Un retard de pilotage d'une à plusieurs dizaines de ns à chaque phase du cycle de commande engendre alors des décalages temporels préjudiciables au regard de la période de résonance.

[0013] Suivant d'autres aspects avantageux de l'invention, le dispositif électronique de pilotage comprend une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prises isolément ou suivant toutes les combinaisons techniquement possibles :

- le nombre total de phases à tension sensiblement constante aux bornes de l'élément piézoélectrique et à charge sensiblement constante aux bornes dudit élément piézoélectrique au cours d'un cycle de résonance respectif est supérieur ou égal à 6 ;
- chaque événement caractéristique est choisi parmi le groupe consistant en : un passage à zéro du courant circulant dans l'élément piézoélectrique, un passage à une valeur prédéfinie de la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique, un passage à une va-

leur prédéfinie de la tension entre une borne de l'élément piézoélectrique et un potentiel de référence, un passage à une valeur respective de tension sensiblement constante de la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique, un passage à une valeur respective de tension sensiblement constante de la tension entre la borne de l'élément piézoélectrique et le potentiel de référence, et un passage à une valeur de déformation de référence, telle qu'une valeur de déformation mesurée via une électrode séparée disposée contre l'élément piézoélectrique ;

- l'événement caractéristique associé aux premier, deuxième et troisième instants temporels ultérieurs est le passage à zéro du courant circulant dans l'élément piézoélectrique ;

l'événement caractéristique étant de préférence le passage à zéro et en décroissant dudit courant ;

- chaque instant temporel ultérieur calculé dépend d'un écart temporel égal à K fois la période du cycle de résonance de l'élément piézoélectrique, K étant un nombre entier de valeur supérieure ou égale à 1 ;
- la valeur du nombre K est déterminée en fonction de la durée de la période du cycle de résonance, et plus la durée de ladite période est courte, plus la valeur du nombre K est élevée ;

la valeur du nombre K étant de préférence supérieure à 2 ;

- chacun des premier, deuxième et troisième instants temporels ultérieurs est égal, à partir l'événement caractéristique, à la somme de l'écart temporel et d'une durée de référence respective ;

chaque durée de référence respective étant de préférence déterminée à partir de l'instant temporel de commutation correspondant lors du cycle de résonance courant ou à partir de la période du cycle de résonance ;

- le module de commande est, pour la commande de commutation d'un interrupteur respectif, configuré pour envoyer un signal de commande audit interrupteur en un instant temporel d'émission respectif, chaque instant temporel d'émission étant égal à l'instant temporel ultérieur de commutation respectif moins une durée de commutation propre audit interrupteur, la durée de commutation étant une durée nécessaire à l'interrupteur pour effectuer ladite commutation à partir du moment où il a reçu le signal de commande correspondant,

la durée de commutation incluant de préférence un délai de propagation du signal de commande correspondant au travers d'un bus de communication et/ou d'une interface d'isolation galvanique et/ou d'un driver de transistor et/ou de portes logiques et/ou de dispositifs de

protection ;
une durée de commutation en ouverture et une durée de commutation en fermeture étant de préférence prédéfinies pour chaque interrupteur ;

- le module de calcul est configuré pour calculer les instants temporels ultérieurs lors de plusieurs cycles de résonance subséquents successifs, les au moins trois instants temporels ultérieurs étant calculés pour chacun desdits cycles subséquents successifs ;
- le module de calcul est configuré pour calculer en outre un quatrième instant temporel ultérieur correspondant à la fermeture du premier interrupteur ;
- l'événement caractéristique associé au quatrième instant temporel ultérieur est le passage à une valeur respective de tension sensiblement constante de la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique ou bien le passage à zéro du courant circulant dans l'élément piézoélectrique ;
- le convertisseur comporte trois interrupteurs aptes à être commandés pour alterner des phases à tension sensiblement constante aux bornes de l'élément piézoélectrique et des phases à charge sensiblement constante aux bornes dudit élément piézoélectrique, et

le module de calcul est configuré pour calculer en outre un cinquième instant temporel ultérieur correspondant à la fermeture d'un troisième interrupteur ;

- l'événement caractéristique associé au cinquième instant temporel ultérieur est le passage à une valeur respective de tension sensiblement constante de la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique ou bien le passage à zéro du courant circulant dans l'élément piézoélectrique ;
- le module de calcul est configuré pour calculer en outre un sixième instant temporel ultérieur correspondant à l'ouverture du troisième interrupteur ;
- l'événement caractéristique associé au sixième instant temporel ultérieur est le passage à zéro du courant circulant dans l'élément piézoélectrique ou bien le passage à une valeur prédéfinie de la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique ;
- le module de mesure est configuré pour mesurer la période du cycle de résonance en détectant deux événements caractéristiques successifs de même type, la période du cycle de résonance correspondant à la durée écoulée entre les deux événements caractéristiques successifs ;

ledit type de l'événement caractéristique étant de préférence un passage à zéro suivant une monotonie prédéfinie d'un courant circulant dans l'élément piézoélectrique ;

- l'événement caractéristique est détecté par comparaison, avec une valeur prédéfinie correspondante

et via un comparateur respectif, d'une grandeur choisie parmi la déformation de l'élément piézoélectrique (typiquement via une électrode séparée sur l'élément piézoélectrique), le courant circulant dans l'élément piézoélectrique, la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique, et la tension entre une borne de l'élément piézoélectrique et un potentiel de référence, tel qu'un potentiel d'une masse électrique du convertisseur d'énergie électrique, et

l'instant temporel ultérieur correspondant dépend en outre d'une durée de comparaison propre audit comparateur, la durée de comparaison étant une durée nécessaire au comparateur pour effectuer ladite comparaison et générer un signal de détection de l'événement caractéristique ;
la durée de comparaison étant de préférence retranchée à l'écart temporel ;

- chaque durée de comparaison est prédéfinie ;
- chaque durée de comparaison est en outre modifiable via une boucle de régulation en fonction d'un écart entre la grandeur observée, telle que la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique, et la valeur prédéfinie correspondante lors d'une détection d'événement(s) au cours d'un cycle de résonance précédent ;
- le convertisseur d'énergie électrique est un convertisseur continu-continu abaisseur, le premier interrupteur relie une première électrode de l'élément piézoélectrique à une première borne de fourniture d'une tension de sortie du convertisseur, et le deuxième interrupteur relie la première électrode de l'élément piézoélectrique à une première borne d'application d'une tension d'entrée du convertisseur ;
- le convertisseur d'énergie électrique est un convertisseur continu-continu abaisseur, et le troisième interrupteur relie la première électrode de l'élément piézoélectrique à une deuxième électrode de l'élément piézoélectrique ;
- le convertisseur d'énergie électrique est un convertisseur continu-continu élévateur, le premier interrupteur relie une première électrode de l'élément piézoélectrique à une première borne d'application d'une tension d'entrée du convertisseur, et le deuxième interrupteur relie la première électrode de l'élément piézoélectrique à une deuxième électrode de l'élément piézoélectrique ;
- le convertisseur d'énergie électrique est un convertisseur continu-continu élévateur, et la première électrode de l'élément piézoélectrique est reliée à une première borne de fourniture d'une tension de sortie du convertisseur par le troisième interrupteur, qui peut être une diode.

[0014] L'invention a aussi pour objet un système électronique de conversion d'énergie électrique comprenant :

- un convertisseur d'énergie électrique comportant un élément piézoélectrique et plusieurs interrupteurs aptes à être commandés pour alterner des phases à tension sensiblement constante aux bornes de l'élément piézoélectrique et des phases à charge sensiblement constante aux bornes dudit élément piézoélectrique ; et
- un dispositif électronique de pilotage du convertisseur d'énergie électrique, le dispositif de pilotage étant tel que défini ci-dessus.

[0015] Suivant un autre aspect avantageux de l'invention, le système électronique de conversion d'énergie électrique est un système de conversion en une énergie électrique continue, tel qu'un système de conversion continu-continu ou un système de conversion alternatif-continu.

[0016] L'invention a également pour objet un procédé de pilotage d'un convertisseur d'énergie électrique, le convertisseur comportant un élément piézoélectrique et plusieurs interrupteurs aptes à être commandés pour alterner des phases à tension sensiblement constante aux bornes de l'élément piézoélectrique et des phases à charge sensiblement constante aux bornes dudit élément piézoélectrique,

le procédé étant mis en œuvre par un dispositif électronique de pilotage et comprenant les étapes suivantes :

- mesure d'une période d'un cycle de résonance de l'élément piézoélectrique ;
- détection d'un événement caractéristique associé au convertisseur d'énergie électrique, l'événement caractéristique appartenant à un cycle de résonance courant ;
- calcul d'au moins trois instants temporels ultérieurs de commutation lors d'au moins un cycle de résonance subséquent, chaque cycle de résonance subséquent étant postérieur au cycle de résonance courant, chaque instant temporel ultérieur de commutation étant calculé à partir d'un événement caractéristique respectif, un premier instant temporel ultérieur correspondant à l'ouverture d'un premier interrupteur, un deuxième instant temporel ultérieur correspondant à la fermeture d'un deuxième interrupteur et un troisième instant temporel ultérieur correspondant à l'ouverture du deuxième interrupteur ; et
- commande d'une commutation de chacun des interrupteurs ;

l'étape de commande comportant une commande de la commutation de l'interrupteur respectif en chacun des instant temporels ultérieurs calculés.

[0017] Ces caractéristiques et avantages de l'inven-

tion apparaîtront plus clairement à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif, et faite en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

- la figure 1 est une représentation schématique d'un système électronique de conversion d'énergie électrique selon l'invention, comprenant un convertisseur d'énergie électrique comportant un élément piézoélectrique et plusieurs interrupteurs aptes à être commandés pour alterner des phases à tension sensiblement constante aux bornes de l'élément piézoélectrique et des phases à charge sensiblement constante aux bornes dudit élément piézoélectrique, et un dispositif électronique de pilotage du convertisseur d'énergie électrique ;
- la figure 2 est un ensemble de courbes représentant un courant circulant dans l'élément piézoélectrique, une déformation mécanique de l'élément piézoélectrique, et la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique pour différentes configurations de conversions d'énergie électrique, à savoir une configuration abaisseur de tension, une configuration élévateur de tension, une configuration fortement abaisseur de tension et une variante de configuration abaisseur de tension ;
- la figure 3 est une représentation schématique du convertisseur d'énergie électrique de la figure 1 pour la configuration élévateur de tension, avec un chronogramme illustrant l'évolution de la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique durant un cycle de résonance dudit élément ;
- la figure 4 est une vue analogue à celle de la figure 3, pour la configuration fortement abaisseur de tension du convertisseur d'énergie électrique ;
- la figure 5 est une vue analogue à celle des figures 3 et 4, pour la variante de configuration abaisseur de tension du convertisseur d'énergie électrique ;
- la figure 6 illustre le calcul d'un premier instant temporel ultérieur de commutation correspondant à l'ouverture d'un premier interrupteur, avec deux chronogrammes représentant l'évolution de la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique et lors de de plusieurs cycles de résonance successifs pour la configuration fortement abaisseur de tension ou la variante de configuration abaisseur de tension, et pour la configuration élévateur de tension ;
- la figure 7 est une vue analogue à celle de la figure 6, illustrant le calcul d'un deuxième instant temporel ultérieur de commutation correspondant à la fermeture d'un deuxième interrupteur du convertisseur d'énergie électrique ;
- la figure 8 est une vue analogue à celle des figures 6 et 7, illustrant le calcul d'un troisième instant temporel ultérieur de commutation correspondant à l'ouverture du deuxième interrupteur du convertisseur d'énergie électrique ;
- la figure 9 est une vue analogue à celle des figures

- 6 à 8, illustrant le calcul d'un quatrième instant temporel ultérieur de commutation correspondant à la fermeture du premier interrupteur du convertisseur d'énergie électrique ;
- la figure 10 est une vue analogue à celle de la figure 9, selon une variante de réalisation pour le calcul du quatrième instant temporel ultérieur de commutation ;
 - la figure 11 est une vue analogue à celle des figures 6 à 10, illustrant le calcul d'un cinquième instant temporel ultérieur de commutation correspondant à la fermeture d'un troisième interrupteur du convertisseur d'énergie électrique ;
 - la figure 12 est une vue analogue à celle de la figure 11, selon une variante de réalisation pour le calcul du cinquième instant temporel ultérieur de commutation ;
 - la figure 13 est une vue analogue à celle des figures 6 à 12, illustrant le calcul d'un sixième instant temporel ultérieur de commutation correspondant à l'ouverture du troisième interrupteur du convertisseur d'énergie électrique ;
 - la figure 14 est une vue analogue à celle de la figure 13, selon une variante de réalisation pour le calcul du sixième instant temporel ultérieur de commutation ; et
 - la figure 15 est un organigramme d'un procédé, selon l'invention, de pilotage du convertisseur d'énergie électrique de la figure 1, le procédé étant mis en œuvre par le dispositif électronique de pilotage de la figure 1.

[0018] Sur la figure 1, un système électronique de conversion d'énergie électrique 5 comprend un convertisseur d'énergie électrique 10 comportant un élément piézoélectrique 15 et plusieurs interrupteurs K_1 , K_2 , K_3 aptes à être commandés pour alterner des phases à tension sensiblement constante aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 et des phases à charge sensiblement constante aux bornes dudit élément piézoélectrique 15 ; et un dispositif électronique 20 de pilotage du convertisseur d'énergie électrique 10.

[0019] Le système électronique de conversion d'énergie électrique 5 est typiquement un système de conversion en une énergie électrique continue, tel qu'un système de conversion continu-continu apte à convertir une première énergie électrique continue reçue en entrée en une deuxième énergie électrique continue délivrée en sortie, ou encore un système de conversion alternatif-continu apte à convertir une énergie électrique alternative reçue en entrée en une énergie électrique continue délivrée en sortie du système de conversion 5.

[0020] Lorsque le système de conversion d'énergie électrique 5 est un système de conversion alternatif-continu, le système de conversion d'énergie électrique 5 comprend de préférence en outre un redresseur de tension, non représenté, connecté en entrée du convertisseur d'énergie électrique 10 et apte à redresser la tension

électrique alternative reçue en entrée du système de conversion 5 pour délivrer une tension électrique redressée en entrée du convertisseur 10, le convertisseur d'énergie électrique 10 étant de préférence un convertisseur continu-continu apte à convertir une énergie électrique continue en une autre énergie électrique continue. Le redresseur de tension est par exemple un pont redresseur, tel qu'un pont de diodes. En variante, le redresseur de tension est formé en partie par des interrupteurs du convertisseur 10.

[0021] L'homme du métier observera que ces différents exemples pour le système conversion 5, qu'il s'agisse d'un système de conversion continu-continu ou bien d'un système de conversion alternatif-continu, sont également présentés dans les documents FR 3 086 471 A1 et FR 3 086 472 A1, notamment en regard de leurs figures 1 à 3, 10, 15, 17 et 19 à 20.

[0022] Le convertisseur d'énergie électrique 10 est de préférence un convertisseur continu-continu, et est également appelé convertisseur DC-DC. Le convertisseur continu-continu a généralement pour rôle de réguler une tension d'alimentation V_{out} d'une charge 22 à une valeur stable, en étant alimenté par une source d'énergie 24 fournissant une tension sensiblement continue V_{in} . La source d'énergie 24 est par exemple une batterie ou un panneau solaire.

[0023] Le convertisseur d'énergie électrique 10 est alors configuré pour élever la valeur de la tension continue entre son entrée et sa sortie, et est alors également appelé convertisseur continu-continu élévateur, ou encore convertisseur continu-continu fortement élévateur ; ou bien est configuré pour abaisser la valeur de la tension continue entre son entrée et sa sortie, et est alors appelé convertisseur continu-continu abaisseur, avec également une variante de convertisseur continu-continu fortement abaisseur.

[0024] Lorsque le convertisseur d'énergie électrique 10 est un convertisseur continu-continu abaisseur, la valeur de la tension d'entrée correspond typiquement à la tension V_{in} de la source d'énergie 24, et la valeur de la tension de sortie correspond à la tension V_{out} aux bornes de la charge 22, la tension V_{in} étant alors supérieure à la tension V_{out} .

[0025] Lorsque le convertisseur d'énergie électrique 10 est un convertisseur continu-continu élévateur, la valeur de la tension d'entrée correspond aussi typiquement à la tension V_{in} de la source d'énergie 24, et la valeur de la tension de sortie correspond à la tension V_{out} aux bornes de la charge 22, la tension V_{in} étant alors inférieure à la tension V_{out} .

[0026] Lorsque le convertisseur d'énergie électrique 10 est un convertisseur continu-continu fortement abaisseur, la valeur de la tension d'entrée correspond par exemple à la différence de tension ($V_{in}-V_{out}$), et la valeur de la tension de sortie correspond par exemple à la tension V_{out} , la différence de tension ($V_{in}-V_{out}$) étant nettement supérieure à la tension V_{out} .

[0027] Lorsque le convertisseur d'énergie électrique

10 est un convertisseur continu-continu abaisseur, selon une variante d'abaisseur, la valeur de la tension d'entrée correspond par exemple à la différence de tension ($V_{in}-V_{out}$), et la valeur de la tension de sortie correspond à la tension V_{out} aux bornes de la charge 22, la différence de tension ($V_{in}-V_{out}$) étant supérieure à la tension V_{out} .

[0028] Le convertisseur d'énergie électrique 10 comporte l'élément piézoélectrique 15, et le dispositif de pilotage 20 est configuré pour faire fonctionner le matériau piézoélectrique de l'élément piézoélectrique 15 à sa résonance afin d'exploiter des phases de transfert de charge permettant de s'affranchir de l'utilisation d'un élément inductif, tout en régulant la tension de sortie en conservant la résonance du matériau piézoélectrique, c'est-à-dire avec des cycles de commutation répétés à une fréquence de fonctionnement dépendant de la fréquence de résonance de l'élément piézoélectrique 15, et en ajustant les durées de phases de commutation respectives à l'intérieur du cycle de résonance.

[0029] Comme connu en soi, l'oscillation mécanique de l'élément piézoélectrique 15 est approximativement sinusoïdale, ainsi que représenté par la courbe 26 à la figure 2 illustrant la déformation mécanique de l'élément piézoélectrique 15 au cours d'un cycle de résonance respectif. Une augmentation ou une diminution de l'énergie stockée sur une période conduit respectivement à une augmentation ou à une diminution de l'amplitude d'oscillation. Par ailleurs, lors d'une phase à charge sensiblement constante aux bornes de l'élément piézoélectrique 15, c'est-à-dire lorsque l'élément piézoélectrique 15 est placé dans un circuit électrique sensiblement ouvert, avec un faible échange de charges électriques entre l'élément piézoélectrique 15 et l'extérieur, une augmentation de l'amplitude des oscillations engendre une augmentation de l'amplitude de la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15, et lors d'une phase à tension sensiblement constante aux bornes de l'élément piézoélectrique 15, cette augmentation d'amplitude d'oscillation conduit à une augmentation d'un courant I_L circulant dans l'élément piézoélectrique 15.

[0030] Par charge sensiblement constante, on entend un échange d'une charge avec l'extérieur qui est inférieur à 10% de la charge qui aurait été échangée avec l'extérieur si la tension avait été maintenue constante. Autrement dit, par charge sensiblement constante, on entend une variation de charge inférieure à 10% de la charge qui aurait été échangée avec l'extérieur de l'élément piézoélectrique 15 si la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 avait été maintenue constante sur la durée temporelle considérée.

[0031] Par circuit électrique sensiblement ouvert, on entend un circuit dont un éventuel courant de fuite conduit à une variation de charge de l'élément piézoélectrique 15 inférieure à 10% de la charge qui aurait été échangée avec l'extérieur de l'élément piézoélectrique 15 si la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 avait été maintenue constante sur la durée temporelle considérée.

[0032] Par tension sensiblement constante, on entend

une variation de tension inférieure à 20%, de préférence inférieure à 10%, de la tension d'entrée ou de sortie du convertisseur 10. À titre d'exemple, si la tension d'entrée du convertisseur 10 est égale à 100V, alors la variation de tension lors de chaque phase à tension sensiblement constante, c'est-à-dire sur chaque palier à tension sensiblement constante, est inférieure à 20% de cette tension, c'est-à-dire inférieure à 20V ; de préférence inférieure à 10 % de cette tension, c'est-à-dire inférieure à 10V.

[0033] Le convertisseur 10 comporte alors plusieurs interrupteurs K_1 , K_2 , K_3 aptes à être commandés pour alterner des phases à tension sensiblement constante et des phases à charge sensiblement constante aux bornes de l'élément piézoélectrique 15, à l'intérieur de périodes de durée sensiblement constante correspondant à la fréquence de fonctionnement du convertisseur 10, dépendant de la fréquence de résonance, également appelée fréquence propre, de l'élément piézoélectrique 15. Les phases à charge sensiblement constante permettent, en régime établi ou permanent, de passer d'une tension constante à une autre et de fermer les interrupteurs qui doivent l'être lorsque la tension à leurs bornes est de préférence nulle afin d'avoir une commutation dite à zéro de tension, également appelée commutation ZVS (de l'anglais *Zero Voltage Switching*).

[0034] La fréquence de résonance est la fréquence à laquelle oscille l'élément piézoélectrique 15 et par conséquent son courant de sortie I_p , visible sur les figures 1 et 3 à 5. Le cycle de conversion est synchronisé sur un mouvement mécanique de l'élément piézoélectrique 15, et la fréquence du pilotage est alors calée sur la fréquence d'oscillation mécanique. En pratique, cette fréquence d'oscillation dépend du point de fonctionnement du convertisseur 10 : valeurs des trois paliers de tension et du courant de sortie. En fonction du point de fonctionnement, cette fréquence d'oscillation évolue typiquement entre la fréquence de résonance dite série du piézoélectrique ($\omega_s=1/\sqrt{LC}$) où L et C correspondent aux inductance et capacité d'une branche résonante 56 décrite ci-après) et la fréquence de résonance dite parallèle du piézoélectrique ($\omega_p=1/\sqrt{L^*C^*C_p/(C+C_p)}$), également respectivement appelés fréquence de résonance et fréquence d'antirésonance de l'élément piézoélectrique 15. La fréquence de fonctionnement du convertisseur 10 est alors comprise entre ces deux fréquences de résonance et d'antirésonance de l'élément piézoélectrique 15. Le point de fonctionnement varie lentement au regard de la fréquence d'oscillation de l'élément piézoélectrique 15. Le point de fonctionnement évolue typiquement à moins de 10kHz, alors que la fréquence d'oscillation de l'élément piézoélectrique 15 est typiquement supérieure ou égale à 100kHz. De ce fait, la fréquence de fonctionnement du convertisseur 10 évolue peu d'une période à la suivante.

[0035] Le nombre total de phases à tension sensiblement constante et de phases à charge sensiblement constante aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 au

cours d'un cycle de résonance est supérieur ou égal à six. Dans l'exemple de la figure 2, ce nombre total de phases est égal à six.

[0036] Ces phases successives d'un cycle de résonance vont alors être décrites dans l'exemple de la figure 2 à six phases, selon un format générique correspondant aux différentes configurations du convertisseur 10. Sont représentés dans ce format générique quatre exemples non limitatifs de convertisseurs : abaisseur, élévateur, fortement abaisseur, ou encore variante d'abaisseur.

[0037] Dans l'exemple de la figure 2, ces différentes phases correspondent à un fonctionnement en régime établi ou permanent du convertisseur 10, c'est-à-dire à partir du moment où la résonance du matériel piézoélectrique est atteinte avec une amplitude sensiblement constante, et alors avec des échanges d'énergie et de charge sensiblement équilibrés sur chaque période T du cycle de résonance. Pour simplifier la description, les pertes dans les interrupteurs à l'état passant, ainsi que les pertes dans le matériau piézoélectrique à la résonance sont négligées.

[0038] La figure 2 représente alors l'évolution du courant I_L circulant dans l'élément piézoélectrique 15 ; de la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15, également représentée sur la figure 1 et 3 à 5 ; et de la déformation mécanique de l'élément piézoélectrique 15, représentée par la courbe 26 ; ceci au cours d'un cycle de résonance et pour quatre configurations de conversion distinctes du convertisseur 10, à savoir une première configuration C1 en abaisseur de tension, une deuxième configuration C2 en élévateur de tension, une troisième configuration C3 en fortement abaisseur de tension, et une quatrième configuration C4 en variante d'abaisseur de tension.

[0039] Par convention, un premier instant temporel de commutation, noté t_2 , correspond à l'ouverture d'un premier interrupteur K_1 , et la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 passe alors d'une tension précédente V_b à une position de circuit ouvert. En ce premier instant temporel de commutation t_2 commence alors une première phase I durant jusqu'à un instant temporel t_3 correspondant à un passage à zéro du courant I_L circulant dans l'élément piézoélectrique 15. Préalablement, l'instant temporel t_2 a été défini de sorte qu'en l'instant temporel t_3 , la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 atteigne une valeur V_a ou bien une valeur V_{zvs} correspondant à la valeur permettant une commutation à zéro de tension de l'interrupteur correspondant.

[0040] A l'instant temporel t_3 , commence une deuxième phase II. En cet instant temporel t_3 , si la valeur V_{zvs} est égale à la valeur V_a , alors l'élément piézoélectrique 15 peut passer de la phase à charge sensiblement constante (ou en circuit sensiblement ouvert) à une phase suivante à tension sensiblement constante à la valeur V_a , et l'instant temporel t_3 forme alors à un deuxième instant temporel de commutation correspondant à la fermeture d'un deuxième interrupteur K_2 . Dans l'exemple de la figure 2, le deuxième instant temporel de commu-

tation est l'instant t_3 dans le cas des première et deuxième configurations C1, C2.

[0041] Si en l'instant temporel t_3 , la valeur V_{zvs} est différente de la valeur V_a , alors l'élément piézoélectrique 15 est maintenu en circuit ouvert jusqu'à ce que le deuxième interrupteur K_2 passe par une tension nulle à ses bornes, et le deuxième instant temporel de commutation correspondant à la fermeture du deuxième interrupteur K_2 et au début de la phase à tension sensiblement constante à la valeur V_a est alors noté t_{3b} , comme représenté sur la figure 2 dans le cas des troisième et quatrième configurations C3, C4.

[0042] Cette deuxième phase II est alors une phase à tension sensiblement constante à la valeur V_a , et dure jusqu'à un instant temporel t_4 qui forme un paramètre de réglage du convertisseur 10, cet instant temporel t_4 permettant de définir la tension, le courant ou encore la puissance souhaitée en sortie du convertisseur 10, comme expliqué par la suite en regard de la figure 8.

[0043] L'instant temporel t_4 correspond alors à la fin de la deuxième phase II et à l'instant auquel le deuxième interrupteur K_2 doit alors être ouvert, l'instant temporel t_4 formant un troisième instant temporel de commutation correspondant à l'ouverture du deuxième interrupteur K_2 .

[0044] Au troisième instant temporel de commutation correspondant à l'ouverture du deuxième interrupteur K_2 débute une troisième phase III correspondant à une phase à charge sensiblement constante, ou encore en circuit sensiblement ouvert, cette troisième phase III durant jusqu'à un instant temporel t_5 défini par le passage à une nouvelle valeur V_c prédéfinie de la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15. Lorsque le convertisseur 10 comporte trois interrupteurs K_1 , K_2 , K_3 aptes à être commandés pour alterner des phases à tension sensiblement constante et des phases à charge sensiblement constante aux bornes de l'élément piézoélectrique 15, l'instant temporel t_5 formant la fin de la troisième phase III correspond typiquement à la fermeture d'un troisième interrupteur K_3 , l'instant temporel t_5 formant alors un cinquième instant temporel de commutation.

[0045] En variante, la fin de la troisième phase III pour passer à une quatrième phase IV à tension sensiblement constante à la valeur égale à V_c est obtenue via la commutation d'une diode correspondante, telle qu'une première diode 36 décrite ci-après dans les exemples des figures 3 et 5.

[0046] A l'instant temporel t_5 débute alors une quatrième phase IV correspondant à une phase à tension sensiblement constante à la valeur V_c , cette quatrième phase IV durant jusqu'à un instant temporel t_6 , ou encore jusqu'à un instant temporel t_6 modulo la période T du cycle de résonance défini par le passage à zéro du courant I_L circulant dans l'élément piézoélectrique 15, et selon une monotonie opposée à celle du passage à zéro en l'instant temporel t_3 . Par convention, l'instant temporel t_6 est égal à la somme de l'instant temporel t_0 et de la période T du cycle de résonance, et est également noté (t_0+T) .

[0047] Dans l'exemple de la figure 2, l'instant temporel t_6 correspond à la fin d'un cycle de résonance de l'élément piézoélectrique 15, le cycle représenté ayant été défini par rapport aux instants temporels de passage à zéro du courant I_L circulant dans l'élément piézoélectrique 15, et non par rapport au premier instant temporel de commutation correspondant à l'ouverture du premier interrupteur K_1 .

[0048] L'instant temporel t_0 , ou encore l'instant temporel t_6 , est obtenu via l'ouverture du troisième interrupteur K_3 lorsque celui-ci est présent, et forme alors un sixième instant temporel de commutation. En variante, l'instant temporel t_0 , ou encore l'instant temporel t_6 , correspond alors à l'ouverture de la première diode 36.

[0049] A partir du passage par zéro du courant I_L circulant dans l'élément piézoélectrique 15 débute alors une cinquième phase V correspondant à une phase à charge sensiblement constante, cette cinquième V phase s'écoulant entre l'instant temporel t_6 et l'instant temporel t_6+t_1 , ou encore entre l'instant temporel t_0 et l'instant temporel t_1 dans l'exemple de la figure 2, étant entendu que l'instant temporel t_6 correspond à l'instant temporel t_0 à un cycle de résonance près. La fin de cette cinquième phase V correspond au moment où la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 atteint une valeur V_b prédéfinie.

[0050] En l'instant temporel t_6+t_1 , ou dans l'exemple de la figure 2 en l'instant temporel t_1 , débute alors une sixième phase VI correspondant à une phase à tension sensiblement constante à la valeur V_b , le début de cette sixième phase VI étant alors obtenu par la fermeture du premier interrupteur K_1 . L'instant temporel t_1 , ou encore l'instant temporel t_6+t_1 selon le cycle de résonance courant considéré, forme alors un quatrième instant temporel de commutation.

[0051] L'homme du métier observera alors que dans cet exemple du cycle de résonance à six phases du convertisseur 10 présenté de façon générique pour différentes configurations C1 à C4 en regard de la figure 2, les trois phases à tension sensiblement constante correspondent aux valeurs V_a , V_b et V_c prédéfinies de la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15, et les trois phases à charge sensiblement constante, ou encore en circuit ouvert, aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 correspondent alors à des phases où la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 varie d'une valeur à l'autre parmi les trois valeurs V_a , V_b et V_c prédéfinies, précisément de la valeur V_a à la valeur V_c , puis à la valeur V_b , et ainsi de suite dans l'exemple de la figure 2.

[0052] Par convention, lorsque le convertisseur 10 a pour but de fournir un courant positif sous une tension maximale V_{max} , les trois valeurs prédéfinies V_a , V_b et V_c sont classées par valeurs croissantes avec $V_a < V_b < V_c$, et le courant I_L circulant dans l'élément piézoélectrique 15 est défini comme positif quand il contribue à fournir un courant positif sous la tension V_{max} . De manière complémentaire, lorsque le convertisseur 10 a pour but de

tirer un courant positif sous la tension maximale V_{max} , les valeurs prédéfinies V_a , V_b et V_c sont classées de manière décroissante avec alors $V_a > V_b > V_c$, et le courant I_L circulant dans l'élément piézoélectrique 15 est défini comme positif quand il contribue à tirer un courant positif sous la tension maximale V_{max} .

[0053] Dans l'exemple de la figure 1, le convertisseur d'énergie électrique 10 est un convertisseur continu-continu abaisseur correspondant à la première configuration C1 de l'exemple de la figure 2. Le premier interrupteur K_1 relie alors une première électrode 30 de l'élément piézoélectrique 15 à une première borne 38 de fourniture de la tension de sortie V_{out} , et un deuxième interrupteur K_2 relie la première électrode 30 de l'élément piézoélectrique à une première borne 32 d'application de la tension d'entrée V_{in} . En complément facultatif, un troisième interrupteur K_3 relie la première électrode 30 de l'élément piézoélectrique 15 à une deuxième électrode 34 dudit élément piézoélectrique. En variante, la quatrième phase à tension sensiblement constante égale à la tension V_c est obtenue via une diode, non représentée, et agencée en lieu et place du troisième interrupteur K_3 , ladite diode reliant alors la première électrode 30 de l'élément piézoélectrique à la deuxième électrode 34 dudit élément piézoélectrique. Selon cette variante, ladite diode est plus précisément reliée à la première électrode 30 de l'élément piézoélectrique 15 par sa cathode à la deuxième électrode 34 dudit élément piézoélectrique par son anode.

[0054] Sur la figure 3, le convertisseur d'énergie électrique 10 est un convertisseur continu-continu élévateur correspondant typiquement à la deuxième configuration C2, et le premier interrupteur K_1 relie la première électrode 30 de l'élément piézoélectrique 15 à la première borne 32 d'application de la tension d'entrée V_{in} du convertisseur, et le deuxième interrupteur K_2 relie la première électrode 30 de l'élément piézoélectrique 15 à la deuxième électrode 34 dudit élément piézoélectrique 15. Dans cet exemple de la figure 3, le convertisseur 10 comporte seulement deux interrupteurs commandés, à savoir les premier et deuxième interrupteurs K_1 , K_2 , les instants de début t_5 et de fin t_6 (ou t_0 selon le cycle de résonance courant considéré) de la quatrième phase IV sont alors obtenus via une première diode 36 connectée par son anode à la première électrode 30 de l'élément piézoélectrique et par sa cathode à la première borne 38 de fourniture de la tension de sortie V_{out} du convertisseur, correspondant à une borne respective de la charge 22. Plus précisément, l'instant temporel t_5 de début de la quatrième phase IV est obtenu via la fermeture de la première diode 36, c'est-à-dire via sa commutation en mode passant, et l'instant temporel t_6 , t_0 de fin de la quatrième phase IV est obtenu via l'ouverture de la première diode 36, c'est-à-dire via sa commutation en mode bloqué.

[0055] Dans l'exemple de la figure 3, le convertisseur 10 comporte en outre une deuxième diode 40 connectée par son anode au premier interrupteur K_1 et par sa ca-

thode à la première électrode 30 de l'élément piézoélectrique, et un condensateur 42 connecté en parallèle aux bornes de la charge 22, c'est-à-dire entre la première borne 38 et une deuxième borne 44 d'application de la tension de sortie V_{out} . Dans cet exemple, la deuxième borne 44 d'application de la tension de sortie V_{out} , une deuxième borne 46 d'application de la tension d'entrée V_{in} et la deuxième électrode 34 de l'élément piézoélectrique 15 sont chacune reliées à une masse électrique 48.

[0056] En variante, non représentée de l'exemple de la figure 3, le convertisseur d'énergie électrique 10 est un convertisseur continu-continu élévateur, et la première électrode 30 de l'élément piézoélectrique est reliée à la première borne 38 de fourniture de la tension de sortie V_{out} du convertisseur par le troisième interrupteur K_3 .

[0057] Chaque interrupteur du convertisseur 10, à savoir le premier interrupteur K_1 , le deuxième interrupteur K_2 , et en complément facultatif le troisième interrupteur K_3 , est de préférence un interrupteur unidirectionnel en courant et en tension. Chaque interrupteur K_1 , K_2 , K_3 comprend par exemple un transistor 50 et une diode antiparallèle 52 intrinsèque au transistor 50.

[0058] Le transistor 50 est, par exemple, un transistor à effet de champ à grille isolée, également appelé MOSFET (de l'anglais *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*). En variante, le transistor 50 est un transistor bipolaire ; un transistor bipolaire à grille isolée, également appelé IGBT (de l'anglais *Insulated Gate Bipolar Transistor*) ; un transistor à base de silicium (Si), un transistor à base de GaN (de l'anglais *Gallium Nitride*) ; un transistor à base de carbure de silicium (SiC), ou un transistor à base de diamant, ou encore un thyristor, ou encore un switch mécanique, tel qu'un micro-switch MEMS (de l'anglais *MicroElectroMechanical System*).

[0059] Sur la figure 3 est également représenté un chronogramme d'évolution de la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 au cours du cycle de résonance à six phases I à VI, ce chronogramme étant identique à celui représenté en figure 2 pour la deuxième configuration C2.

[0060] Lorsque le convertisseur 10 est un convertisseur continu-continu élévateur et en variante de l'exemple de la figure 3, le convertisseur 10 comporte le troisième interrupteur K_3 à la place de la première diode 36, le troisième interrupteur K_3 reliant alors la première électrode 30 de l'élément piézoélectrique 15 à la première borne 38 de fourniture de la tension de sortie V_{out} .

[0061] Sur la figure 4, le convertisseur d'énergie électrique 10 est un convertisseur continu-continu fortement abaisseur, correspondant à la troisième configuration C3 de la figure 2. Le premier interrupteur K_1 relie la première électrode 30 de l'élément piézoélectrique à la première borne 38 de fourniture de la tension de sortie V_{out} , et le deuxième interrupteur K_2 relie la première électrode 30 de l'élément piézoélectrique à la première borne 32 d'application de la tension d'entrée V_{in} . Dans cet exemple, le convertisseur 10 comporte seulement deux interrupteurs commandés, à savoir les premier et deuxième interrup-

teurs K_1 , K_2 , et le convertisseur 10 comporte alors en outre plusieurs diodes additionnelles 54 formant avec l'élément piézoélectrique 15 un pont, schématisé sous la forme d'un pont en H, avec les extrémités des branches du pont interconnectées. Dans cet exemple, le convertisseur 10 comporte également le condensateur 42 connecté en parallèle et aux bornes de la charge 22, c'est-à-dire entre les première et deuxième bornes 38, 44 de fourniture de la tension de sortie V_{out} . La deuxième borne 44 de fourniture de la tension de sortie V_{out} et la deuxième borne 46 d'application de la tension d'entrée V_{in} sont par exemple reliées à la masse électrique 48.

[0062] Sur la figure 4 est également représenté un chronogramme d'évolution de la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 au cours du cycle de résonance, ce chronogramme étant identique à celui de la figure 2 pour la troisième configuration C3.

[0063] Sur la figure 5, le convertisseur d'énergie électrique 10 est un convertisseur continu-continu selon une variante d'abaisseur, correspondant à la quatrième configuration C4. Dans cet exemple, le premier interrupteur K_1 relie la première électrode 30 de l'élément piézoélectrique 15 à la première borne 38 d'application de la tension de sortie V_{out} , et le deuxième interrupteur K_2 relie la première électrode 30 de l'élément piézoélectrique à la première borne 32 d'application de la tension d'entrée V_{in} . Dans l'exemple de la figure 5, le convertisseur 10 comporte seulement deux interrupteurs, à savoir les premier et deuxième interrupteurs K_1 , K_2 , et la quatrième phase correspondant à la phase à tension sensiblement constante à la valeur V_c est obtenue via la première diode 36 en série avec l'interrupteur K_1 , reliant la deuxième électrode 34 de l'élément piézoélectrique à la première électrode 30 de l'élément piézoélectrique. La première diode 36 est connectée par son anode à la deuxième électrode 34 de l'élément piézoélectrique et par sa cathode à l'interrupteur K_1 .

[0064] Dans cet exemple, le convertisseur 10 comporte en outre la deuxième diode 40 reliant la deuxième électrode 34 de l'élément piézoélectrique à la deuxième borne 44 de fourniture de la tension de sortie V_{out} , la deuxième diode 40 étant connectée par sa cathode à la deuxième électrode 34 de l'élément piézoélectrique et par son anode à la deuxième borne 44, et le condensateur 42 entre les première et deuxième bornes 38, 44 de fourniture de la tension de sortie V_{out} , c'est-à-dire aux bornes et en parallèle de la charge 22. La deuxième borne 44 de fourniture de la tension de sortie V_{out} et la deuxième borne 46 d'application de la tension d'entrée V_{in} sont par exemple reliées à la masse électrique 48.

[0065] Sur la figure 5 est également représenté un chronogramme d'évolution de la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 au cours du cycle de résonance, ce chronogramme étant identique à celui de la figure 2 pour la quatrième configuration C4.

[0066] L'élément piézoélectrique 15 est connu en soi, et est typiquement modélisé, proche du mode de résonance exploité, sous la forme d'un condensateur C_p et

de la branche résonante 56 connectée en parallèle du condensateur C_p , le condensateur C_p et la branche résonante 56 étant connectés entre les première et deuxième électrodes 30, 34 de l'élément piézoélectrique. La branche résonante 56 est typiquement une branche RLC formée d'un condensateur, d'une résistance et d'une inductance connectés en série et non représentés. La tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique correspond alors typiquement à la tension aux bornes du condensateur C_p .

[0067] Le dispositif électronique de pilotage 20 est configuré pour piloter le convertisseur d'énergie électrique 10, en particulier pour piloter la commande des interrupteurs K_1 , K_2 , K_3 du convertisseur, afin d'alterner des phases à tension sensiblement constante aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 et des phases à charge sensiblement constante, c'est-à-dire en circuit sensiblement ouvert, aux bornes dudit élément piézoélectrique 15.

[0068] Le dispositif électronique de pilotage 20 comprend un module 60 de mesure de la période T du cycle de résonance de l'élément piézoélectrique 15, un module 62 de détection d'au moins un événement caractéristique associé au convertisseur 10 et appartenant à un cycle de résonance courant ; et un module 64 de commande d'une commutation respective de chaque interrupteur K_1 , K_2 , K_3 .

[0069] Selon l'invention, le dispositif électronique de pilotage 20 comprend en outre un module 66 de calcul d'au moins trois instants temporels ultérieurs de commutation t_2 , t_3 ou t_{3b} , t_4 lors d'au moins un cycle de résonance subséquent, chaque instant temporel ultérieur de commutation étant calculé à partir d'un événement caractéristique respectif, et le module de commande 64 est alors configuré pour commander la commutation de l'interrupteur K_1 , K_2 respectif en chacun des instants temporels ultérieurs t_2 , t_3 , t_{3b} , t_4 calculés.

[0070] Le module de mesure 60, le module de détection 62, le module de commande 64 et le module de calcul 66 sont par exemple réalisés chacun sous forme d'un circuit électronique comportant un ou plusieurs composants électroniques, et notamment des comparateurs lorsque des comparaisons sont effectuées.

[0071] En variante, le module de mesure 60, le module de détection 62, le module de commande 64 et le module de calcul 66 sont chacun réalisés sous forme d'un composant logique programmable, tel qu'un FPGA (de l'anglais *Field Programmable Gate Array*), ou sous forme d'un circuit intégré, tel qu'un ASIC (de l'anglais *Application Specific Integrated Circuit*) ou encore sous forme d'un calculateur, tel qu'un microcontrôleur, un processeur. En variante encore, le module de mesure 60, le module de détection 62, le module de commande 64 et le module de calcul 66 sont implémentés ensemble au sein d'un unique composant matériel, tel qu'un unique composant logique programmable, un unique circuit intégré, ou unique calculateur.

[0072] Le module de mesure 60 est configuré pour mesurer la période T du cycle de résonance de l'élément

piézoélectrique 15. Le module de mesure 60 est par exemple configuré pour mesurer cette période T du cycle de résonance en détectant deux événements caractéristiques successifs de même type, la période T du cycle de résonance correspondant alors à la durée écoulée entre les deux événements caractéristiques successifs. Le type de l'événement caractéristique utilisé pour la mesure de la période T du cycle de résonance est typiquement un passage à zéro suivant une monotonie prédéfinie du courant interne I_L de l'élément piézoélectrique 15, comme illustré sur la figure 13 avec la mesure d'une durée T_{mes} entre les deux passages à zéro suivant une monotonie prédéfinie du courant interne I_L .

[0073] Dans l'exemple de la figure 2, le module de mesure 60 est configuré pour mesurer la période T du cycle de résonance en détectant deux passages à zéro par valeur décroissante du courant interne I_p de l'élément piézoélectrique 15, c'est-à-dire suivant une décroissance dudit courant interne I_p , la période T du cycle de résonance correspondant alors à la durée écoulée entre ces deux passages successifs à zéro par valeurs décroissantes. En variante, le module de mesure 60 est configuré pour mesurer la période T du cycle de résonance en détectant deux passages successifs à zéro par valeurs croissantes du courant interne I_L de l'élément piézoélectrique 15, c'est-à-dire deux passages successifs à zéro en croissance dudit courant interne I_L .

[0074] Le module de détection 62 est configuré pour détecter au moins un événement caractéristique associé au convertisseur d'énergie électrique 10, l'au moins un événement caractéristique appartenant au cycle de résonance courant.

[0075] Chaque événement caractéristique est choisi parmi le groupe consistant en : un passage à zéro du courant I_L circulant dans l'élément piézoélectrique 15, un passage à une valeur prédéfinie V_{ref0} de la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15, un passage à une valeur prédéfinie de la tension entre une électrode 30, 34 de l'élément piézoélectrique 15 et un potentiel de référence, un passage à une valeur respective de tension sensiblement constante V_a , V_b , V_c de la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 et un passage à une valeur respective de tension sensiblement constante de la tension entre l'électrode 30, 34 de l'élément piézoélectrique 15 et le potentiel de référence. Le ou les événements caractéristiques utilisés de préférence selon l'instant temporel de commutation associé seront décrits plus en détail par la suite.

[0076] Le module de commande 64 est configuré pour commander la commutation de chacun des interrupteurs utilisés pour alterner des phases à tension sensiblement constante aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 et des phases à charge sensiblement constante aux bornes dudit élément piézoélectrique 15, notamment pour commander le premier interrupteur K_1 et le deuxième interrupteur K_2 , voir en complément facultatif le troisième interrupteur K_3 .

[0077] L'homme du métier comprendra bien entendu

que les bornes de l'élément piézoélectrique 15 correspondent aux première 30 et deuxième 34 électrodes de l'élément piézoélectrique 15, et sont alors également notées bornes 30, 34 de l'élément piézoélectrique. Dans la présente description, les bornes 30, 34 de l'élément piézoélectrique sont alors identiques aux électrodes 30, 34 de l'élément piézoélectrique.

[0078] Dans les exemples des figures 1 à 5, et en particulier des première, deuxième, troisième et quatrième configurations C1, C2, C3, C4, lors du cycle de résonance courant, le premier instant temporel de commutation t_2 correspond à l'ouverture du premier interrupteur K_1 , le deuxième instant temporel de commutation t_3 , t_{3b} correspond à la fermeture du deuxième interrupteur K_2 , et le troisième instant temporel de commutation t_4 correspond à l'ouverture du deuxième interrupteur K_2 .

[0079] En complément facultatif, le quatrième instant temporel de commutation t_1 (ou t_6+t_1) correspond à la fermeture du premier interrupteur K_1 .

[0080] En complément facultatif encore, lorsque le convertisseur 10 comporte le troisième interrupteur K_3 , le cinquième instant temporel de commutation t_5 correspond à la fermeture du troisième interrupteur K_3 , et le sixième instant temporel de commutation t_0 correspond à l'ouverture du troisième interrupteur K_3 .

[0081] Le module de calcul 66 est configuré pour calculer au moins trois instants temporels ultérieurs de commutation t_2^* , t_3^* ou t_{3b}^* , t_4^* lors d'au moins un cycle de résonance subséquent, chaque cycle de résonance subséquent étant postérieur au cycle de résonance courant, chaque instant temporel ultérieur de commutation t_2^* , t_3^* ou t_{3b}^* , t_4^* étant calculé à partir d'un événement caractéristique respectif.

[0082] Parmi les instants temporels ultérieurs de commutation calculés par le module de calcul 66, un premier instant temporel ultérieur t_2^* correspond à l'ouverture du premier interrupteur K_1 lors du cycle de résonance subséquent ; et un deuxième instant temporel ultérieur t_3^* ou t_{3b}^* correspond à la fermeture du deuxième interrupteur K_2 , le deuxième instant temporel ultérieur t_{3b}^* correspondant à la fermeture dudit deuxième interrupteur K_2 suite à une excursion de la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 à la valeur de tension V_{zvs} permettant ensuite une commutation douce du deuxième interrupteur K_2 , c'est-à-dire une commutation à zéro de tension dudit deuxième interrupteur K_2 , cette excursion à la tension V_{zvs} étant avantageusement mise en œuvre pour les troisième et quatrième configurations C3, C4. Parmi les instants temporels ultérieurs de commutation calculés par le module de calcul 66, un troisième instant temporel ultérieur t_4^* correspond à l'ouverture du deuxième interrupteur K_2 lors du cycle de résonance subséquent.

[0083] En complément, un quatrième instant temporel ultérieur t_1^* correspond à la fermeture du premier interrupteur K_1 lors du cycle de résonance subséquent.

[0084] En complément facultatif encore, notamment lorsque le convertisseur 10 comporte trois interrupteurs,

et alors en outre le troisième interrupteur K_3 , un cinquième instant temporel ultérieur t_5^* correspond à la fermeture du troisième interrupteur K_3 lors du cycle de résonance subséquent. Selon ce complément facultatif, un sixième instant temporel ultérieur t_0^* correspond à l'ouverture du troisième interrupteur K_3 lors du cycle de résonance subséquent.

[0085] Le module de calcul 66 est de préférence configuré pour calculer chaque instant temporel ultérieur t_2^* , t_3^* ou t_{3b}^* , t_4^* , t_1^* , t_5^* , t_0^* en fonction d'un écart temporel égal à K fois la période T du cycle de résonance de l'élément piézoélectrique 15, K étant un nombre entier de valeur supérieure ou égale à 1.

[0086] Chaque instant temporel ultérieur de commutation t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* , t_1^* , t_5^* , t_0^* est de préférence égal à la somme de l'instant temporel de commutation t_2 , t_3 ou t_{3b} , t_4 , t_1 , t_5 , t_0 correspondant lors du cycle de résonance courant et dudit écart temporel égal à $K.T$. En particulier, le premier instant temporel ultérieur t_2^* est égal à la somme du premier instant temporel t_2 et de l'écart temporel $K.T$; le deuxième instant temporel ultérieur t_3^* , t_{3b}^* est égal à la somme du deuxième instant temporel de commutation t_3 , t_{3b} et de l'écart temporel $K.T$; et le troisième instant temporel ultérieur t_4^* est égal à la somme du quatrième instant temporel de commutation t_4 et de l'écart temporel $K.T$.

[0087] En complément facultatif, le quatrième instant temporel ultérieur t_1^* est égal à la somme du quatrième instant temporel de commutation t_1 et de l'écart temporel $K.T$. En complément facultatif encore, le cinquième instant temporel ultérieur t_5^* est égal à la somme du cinquième instant temporel de commutation t_5 et de l'écart temporel $K.T$; et le sixième instant temporel ultérieur t_0^* est égal à la somme du sixième instant temporel de commutation t_0 et de l'écart temporel $K.T$.

[0088] En complément facultatif, la valeur du nombre K pris en compte pour définir l'écart temporel est déterminée en fonction de la durée de la période T du cycle de résonance. Selon ce complément facultatif, plus la durée de ladite période T du cycle de résonance est courte, plus la valeur du nombre K est élevée. La valeur du nombre K est de préférence supérieure à 2.

[0089] En complément facultatif encore, le module de calcul 66 est configuré pour calculer les instants temporels ultérieurs de commutation t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* , t_1^* , t_5^* , t_0^* lors de plusieurs cycles de résonance subséquents successifs, les au moins trois instants temporels ultérieurs t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* étant alors calculés pour chacun desdits cycles subséquents successifs. Pour les premier, deuxième et troisième instants temporels ultérieurs t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* , l'événement caractéristique à partir duquel est calculé l'instant temporel ultérieur de commutation respectif est de préférence le passage à zéro du courant I_L circulant dans l'élément piézoélectrique 15, et par exemple le passage à zéro et par valeurs décroissantes dudit courant I_L dans l'élément piézoélectrique 15. Le module de calcul 66 est alors configuré pour calculer chacun des premier, deuxième et troisième instant tem-

porel ultérieur t_{2*} , t_{3*} , t_{3b*} , t_{4*} comme étant égal - à partir de l'événement caractéristique, c'est-à-dire à partir du passage à zéro du courant I_L - à la somme de l'écart temporel K.T et d'une durée de référence respective. Chaque durée de référence respective est de préférence déterminée à partir de l'instant temporel de commutation correspondant t_2 , t_3 , t_{3b} , t_4 , c'est-à-dire à partir respectivement du premier t_2 , du deuxième t_3 , t_{3b} et du troisième t_4 instant temporel de commutation, lors du cycle de résonance courant ou bien à partir d'un instant temporel associé au début de la période T du cycle de résonance, tel que le sixième instant temporel de commutation t_6 .

[0090] Selon ce complément, pour le premier instant temporel ultérieur t_{2*} , la durée de référence respective Δt_2 est égale à la durée écoulée entre l'événement caractéristique associé et le premier instant temporel de commutation t_2 lors du cycle de résonance courant, c'est-à-dire à la durée entre l'instant t_0 et le premier instant temporel de commutation t_2 , i.e. à la différence ($t_2 - t_0$) dans l'exemple des figures 2 et 6. Pour le deuxième instant temporel ultérieur t_{3*} , la durée de référence respective est par exemple égale à la moitié de la période T du cycle de résonance, c'est-à-dire à la demi-période T/2 du cycle de résonance. En variante, la durée de référence respective pour le deuxième instant temporel ultérieur t_{3*} est égale à la durée écoulée entre l'événement caractéristique, tel que le passage à zéro du courant I_L , et le deuxième instant temporel de commutation t_3 lors du cycle de résonance courant, cette durée de référence Δt_3 étant alors égale à la durée entre l'instant t_0 et le deuxième instant temporel de commutation t_3 , c'est-à-dire à la différence ($t_3 - t_0$) dans l'exemple des figures 2 et 7. Pour le deuxième instant temporel ultérieur t_{3b*} , suite à l'excursion préalable à la valeur de tension V_{zvs} , la durée de référence respective Δt_{3b} est typiquement égale à la durée écoulée entre l'événement caractéristique et le deuxième instant temporel de commutation t_{3b} lors du cycle de résonance courant, cette durée de référence respective étant alors égale à la durée entre l'instant t_0 et le deuxième instant temporel de commutation t_{3b} , c'est-à-dire à la différence ($t_{3b} - t_0$) dans l'exemple des figures 2 et 7. Pour le troisième instant temporel ultérieur t_{4*} , la durée de référence respective Δt_4 est égale à la durée écoulée entre l'événement caractéristique et le troisième instant temporel de commutation t_4 lors du cycle de résonance courant, cette durée de référence respective Δt_4 étant alors égale à la durée entre l'instant t_0 et le troisième instant temporel de commutation t_4 , c'est-à-dire à la différence ($t_4 - t_0$) dans l'exemple des figures 2 et 8.

[0091] En complément facultatif, l'événement caractéristique associé au quatrième instant temporel ultérieur t_{1*} est le passage de la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 à une valeur respective de tension sensiblement constante, telle que la valeur V_b dans l'exemple de la figure 9. En variante, l'événement caractéristique associé au quatrième instant temporel ultérieur t_{1*} est le passage à zéro du courant I_L circulant dans

l'élément piézoélectrique 15, et par exemple le passage à zéro par valeurs décroissantes dudit courant I_L , comme dans l'exemple de la figure 10.

[0092] Selon ce complément facultatif, lorsque l'événement caractéristique associé au quatrième instant temporel ultérieur t_{1*} est le passage de la tension V_p à une valeur respective de tension sensiblement constante, le module de calcul 66 est configuré pour calculer le quatrième instant temporel ultérieur t_{1*} en fonction du seul écart temporel K.T, le quatrième instant temporel ultérieur t_{1*} étant égal à l'écart temporel K.T à partir dudit événement caractéristique, c'est-à-dire à l'écart temporel K.T ajouté à l'instant temporel de détection dudit événement caractéristique.

[0093] Selon ce complément facultatif, lorsque l'événement caractéristique associé au quatrième instant temporel ultérieur t_{1*} est le passage à zéro du courant I_L , le module de calcul 66 est configuré pour calculer le quatrième instant temporel ultérieur t_{1*} comme étant égal à la somme de l'écart temporel K.T et d'une durée de référence respective Δt_1 . Cette durée de référence respective Δt_1 correspond alors à la durée écoulée entre l'événement caractéristique et le quatrième instant temporel de commutation t_4 lors du cycle de résonance courant, cette durée de référence respective Δt_1 étant alors égale à la durée entre l'instant t_0 et le quatrième instant temporel de commutation t_4 , c'est-à-dire à la différence ($t_4 - t_0$) dans l'exemple de la figure 10.

[0094] En complément facultatif encore, lorsque le convertisseur 10 comporte trois interrupteurs, et alors en outre le troisième interrupteur K_3 , l'événement caractéristique associé au cinquième instant temporel ultérieur t_{5*} est le passage de la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 à une valeur respective de tension sensiblement constante, telle que la valeur V_c dans l'exemple de la figure 11. En variante, l'événement caractéristique associé au cinquième instant temporel ultérieur t_{5*} est le passage à zéro du courant I_L circulant dans l'élément piézoélectrique 15, et par exemple le passage à zéro par valeurs décroissantes dudit courant I_L .

[0095] Selon ce complément facultatif, lorsque l'événement caractéristique associé au cinquième instant temporel ultérieur t_{5*} est le passage de la tension V_p à la valeur respective de tension sensiblement constante, le module de calcul 66 est configuré pour calculer le cinquième instant temporel ultérieur t_{5*} à partir du seul écart temporel K.T, le cinquième instant temporel ultérieur t_{5*} étant égal à l'écart temporel K.T à partir dudit événement caractéristique, c'est-à-dire à l'écart temporel K.T ajouté à l'instant temporel de détection dudit événement caractéristique.

[0096] Selon ce complément facultatif, lorsque l'événement caractéristique associé au cinquième instant temporel ultérieur t_{5*} est le passage à zéro du courant I_L , le module de calcul 66 est configuré pour calculer le cinquième instant temporel ultérieur t_{5*} comme étant égal, à partir de l'événement caractéristique, à la somme de l'écart temporel K.T et d'une durée de référence res-

pective Δt_5 . Cette durée de référence respective Δt_5 est alors typiquement égale à la durée écoulée entre l'évènement caractéristique et le cinquième instant temporel de commutation t_5 lors du cycle de résonance courant, cette durée de référence respective Δt_5 étant égale à la durée entre l'instant t_0 et le cinquième instant temporel de commutation t_5 , c'est-à-dire à la différence ($t_5 - t_0$) dans l'exemple de la figure 12.

[0097] En complément facultatif encore, l'évènement caractéristique associé au sixième instant temporel ultérieur t_0^* est le passage à zéro du courant I_L circulant dans l'élément piézoélectrique 15, et par exemple le passage à zéro par valeurs décroissantes dudit courant I_L , comme dans l'exemple de la figure 13. En variante, l'évènement caractéristique associé au sixième instant temporel ultérieur t_0^* est le passage de la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique à une valeur prédéfinie, telle que la valeur V_{ref0} dans l'exemple de la figure 14.

[0098] Selon ce complément facultatif encore, le module de calcul 66 est alors configuré pour calculer le sixième instant temporel ultérieur t_0^* à partir du seul écart temporel K.T, le sixième instant temporel ultérieur t_0^* étant égal à l'écart temporel K.T à partir dudit évènement caractéristique, c'est-à-dire à l'écart temporel K.T ajouté à l'instant temporel de détection dudit évènement caractéristique.

[0099] Le module de détection 62 est par exemple configuré pour détecter l'évènement caractéristique associé à l'instant temporel ultérieur respectif par comparaison, avec une valeur prédéfinie correspondante et via un comparateur respectif, d'une grandeur choisie parmi la déformation de l'élément piézoélectrique 15 (typiquement via une électrode séparée disposée contre l'élément piézoélectrique 15), le courant I_L circulant dans l'élément piézoélectrique 15, la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15, et la tension entre une borne 30, 34 de l'élément piézoélectrique 15 et un potentiel de référence, tel que le potentiel de la masse électrique 48 du convertisseur d'énergie électrique.

[0100] En complément facultatif, le module de calcul 66 est alors configuré pour calculer un instant temporel ultérieur respectif en fonction en outre d'une durée de comparaison associée au comparateur utilisé pour détecter l'évènement caractéristique dudit instant temporel ultérieur respectif. La durée de comparaison, telle que la durée t_{comp1} dans l'exemple de la figure 9, la durée t_{comp5} dans l'exemple de la figure 11, ou encore la durée t_{comp0} dans l'exemple de la figure 13, est une durée nécessaire au comparateur pour effectuer ladite comparaison et générer un signal de détection de l'évènement caractéristique correspondant.

[0101] Selon ce complément facultatif, le module de calcul 66 est alors typiquement configuré pour retrancher ladite durée de comparaison t_{comp1} , t_{comp5} , t_{comp0} à l'écart temporel K.T.

[0102] Selon ce complément facultatif encore, chaque durée de comparaison t_{comp1} , t_{comp5} , t_{comp0} est par exemple une mesure prédéfinie.

[0103] En complément facultatif encore, chaque durée de comparaison t_{comp1} , t_{comp5} , t_{comp0} est en outre modifiable via une première boucle de régulation 70 en fonction d'un écart entre la grandeur observée, telle que la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15, et la valeur prédéfinie correspondante lors d'une détection d'évènement(s) au cours d'un cycle de résonance précédent. Dans l'exemple de la figure 9, la première boucle de régulation 70 sur la durée de comparaison t_{comp1} est représentée par le bloc intitulé « t_{comp1} correction », la régulation étant effectuée dans l'exemple de la figure 9 en fonction de l'écart au cours d'un cycle de résonance précédent entre la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique et la valeur prédéfinie V_p lors de la détection d'évènement(s) au cours de ce cycle de résonance précédent. Dans l'exemple de la figure 11, la première boucle de régulation 70 pour modifier la durée de comparaison t_{comp5} est représentée par le bloc appelé « t_{comp5} correction », la régulation étant effectuée dans cet exemple en fonction de l'écart au cours d'un cycle de résonance précédent entre la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique et la valeur prédéfinie V_c lors de la détection d'évènement(s) au cours de ce cycle de résonance précédent. Dans l'exemple de la figure 13, la première boucle de régulation 70 pour modifier la durée de comparaison t_{comp0} est représentée via le bloc appelé « t_{comp0} correction », et dans cet exemple la régulation est effectuée en fonction de l'écart au cours d'un cycle de résonance précédent entre la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 et la valeur prédéfinie V_c lors de la détection d'évènement(s) au cours de ce cycle de résonance précédent. Dans cet exemple de la figure 13, la première boucle de régulation 70 est en outre apte à vérifier si la sortie de la zone à tension sensiblement constante V_c s'est bien effectuée sur un zéro de courant.

[0104] En complément facultatif encore, lorsque la première boucle de régulation 70 pour modifier la durée de comparaison est mise en œuvre en fonction d'un écart entre la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 et une valeur prédéfinie respective, telle que la valeur V_c dans l'exemple de la figure 11, la première boucle de régulation 70 est de préférence configurée pour effectuer cette régulation via une mesure d'enveloppe du signal de la tension V_p , avec de préférence encore une mise en œuvre bornée par deux butées, à savoir une butée minimale et une butée maximale sur la valeur de la durée de comparaison t_{comp5} , afin d'améliorer encore la robustesse de fonctionnement de ladite première boucle de régulation 70. Sur la figure 11, les traits en pointillés entre les instants de commutation t_4 et t_5 représentent des évolutions typiques de la tension V_p si l'ouverture en le troisième instant de commutation t_4 arrive trop tôt ou trop tard, et donnent ainsi une idée de ce qu'il faut observer : sur/sous tension par rapport à la valeur prédéfinie V_c , dérivée positive ou négative à l'application de la valeur prédéfinie V_c . Dans le cas où le troisième instant de commutation t_4 arrive trop tôt, alors la tension V_p est supérieure à la valeur prédéfinie V_c en

l'instant suivant de commutation t_5 ; et inversement si le troisième instant de commutation t_4 arrive trop tard, alors la tension V_p est inférieure à la valeur prédéfinie V_c en l'instant suivant de commutation t_5 . Ceci est détectable via la mesure d'enveloppe de la tension V_p ou d'une valeur crête de la tension V_p . L'homme du métier observera alors que la mesure d'enveloppe est plus facile à mettre en œuvre, qu'une mesure instantanée de la tension V_p en l'instant t_5 .

[0105] Le module de commande 64 est alors configuré pour commander la commutation de chaque interrupteur K_1 , K_2 , K_3 respectifs en chacun des instants temporels ultérieurs t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* , t_1^* , t_5^* , t_0^* calculé.

[0106] Le module de commande 64 est, pour la commande de commutation d'un interrupteur K_1 , K_2 , K_3 respectif, typiquement configuré pour envoyer un signal de commande audit interrupteur en un instant temporel d'émission t_{e1} , t_{e2} , t_{e3} , t_{e3b} , t_{e4} , t_{e1} , t_{e5} , t_{e0} respectif, chaque instant temporel d'émission étant égal à l'instant temporel ultérieur de commutation respectif moins une durée de commutation t_{o2} , t_{e3} , t_{e3b} , t_{o4} , t_{c1} , t_{c5} , t_{o0} propre audit interrupteur, la durée de commutation étant une durée nécessaire à l'interrupteur pour effectuer ladite commutation à partir du moment où il a reçu le signal de commande correspondant de la part du module de commande 64. Cette durée de commutation inclut typiquement un délai de propagation de la commande jusqu'au transistor, par exemple incluant des délais associés au passage d'une barrière d'isolation galvanique et/ou d'un driver de transistor permettant de piloter le transistor avec un niveau adéquat de courant/tension. Dans les exemples des figures 6 à 14, chaque instant temporel d'émission t_{e1} , t_{e2} , t_{e3} , t_{e3b} , t_{e4} , t_{e1} , t_{e5} , t_{e0} est alors égal à une durée D respective à partir de l'événement caractéristique correspondant, c'est-à-dire à la durée D respective ajoutée à l'instant temporel de détection dudit événement caractéristique. La durée D respective varie d'un exemple à l'autre, et est précisée sur chacune des figures 6 à 14.

[0107] Selon ce complément facultatif, une durée de commutation en ouverture t_o et une durée de commutation en fermeture t_c sont de préférence définies pour chaque interrupteur K_1 , K_2 , K_3 .

[0108] Selon ce complément facultatif, dans l'exemple de la figure 6, le module de commande 44 est alors configuré pour envoyer le signal de commande au premier interrupteur K_1 en un premier instant temporel d'émission t_{e2} égal au premier instant temporel ultérieur de commutation t_2^* moins la durée de commutation t_{o2} en ouverture propre au premier interrupteur K_1 . De manière analogue, dans l'exemple de la figure 7, le module de commande 44 est configuré pour envoyer le signal de commande de fermeture au deuxième interrupteur K_2 en un deuxième instant temporel d'émission t_{e3} , t_{e3b} égal au deuxième instant temporel ultérieur de commutation t_3^* , t_{3b}^* moins la durée de commutation en fermeture t_{c3} propre au deuxième interrupteur K_2 . Dans l'exemple de la figure 8, le module de commande 44 est configuré pour envoyer

le signal de commande d'ouverture au deuxième interrupteur K_2 en un troisième instant temporel d'émission t_{e4} égal au troisième instant temporel ultérieur t_4^* moins la durée de commutation en ouverture t_{o4} propre au deuxième interrupteur K_2 . Dans l'exemple des figures 9 et 10, le module de commande 44 est configuré pour envoyer le signal de commande de fermeture au premier interrupteur K_1 en un quatrième instant temporel d'émission t_{e1} égal au quatrième instant temporel ultérieur t_1^* moins la durée de commutation en fermeture t_{c1} propre au premier interrupteur K_1 . Dans l'exemple des figures 11 et 12, le module de commande 44 est configuré pour envoyer le signal de commande de fermeture au troisième interrupteur K_3 en un cinquième instant temporel d'émission t_{e5} égal au cinquième instant temporel ultérieur t_5^* moins la durée de commutation en fermeture t_{c5} propre au troisième interrupteur K_3 . De manière analogue encore, dans l'exemple des figures 13 et 14, le module de commande 44 est configuré pour envoyer le signal de commande d'ouverture au troisième interrupteur K_3 en un sixième instant temporel t_{e0} égal au sixième instant temporel ultérieur t_0^* moins la durée de commutation en ouverture t_{o0} propre au troisième interrupteur K_3 .

[0109] En complément facultatif, chaque durée de référence respective Δt_2 , Δt_4 , Δt_1 , Δt_5 est en outre modifiable via une deuxième boucle de régulation 72 en fonction d'un écart entre la grandeur observée, telle que la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15, et la valeur prédéfinie correspondante lors d'une détection d'événement(s) au cours d'un cycle de résonance précédent. Chaque deuxième boucle de régulation 72 comporte par exemple un bloc 74 de calcul d'un coefficient correctif suivi d'un bloc multiplicateur 76. Le bloc de calcul 74 est alors configuré pour calculer un coefficient correctif α_2 , α_4 , α_1 , α_2 , α_5 respectif, et à délivrer ce coefficient correctif α_2 , α_4 , α_1 , α_2 , α_5 en entrée du bloc multiplicateur 76. Le bloc multiplicateur 76 est ensuite apte à multiplier ce coefficient correctif α_2 , α_4 , α_1 , α_2 , α_5 avec la valeur de la période T du cycle de résonance, afin de délivrer en sortie une durée égale au produit du coefficient correctif α_2 , α_4 , α_1 , α_2 , α_5 et de la période T du cycle de résonance, pour modifier la durée de référence respective.

[0110] En complément facultatif encore, la deuxième boucle de régulation 72 est configurée en outre pour mettre en œuvre une mesure d'enveloppe de la grandeur observée, représentée sous forme de traits pointillés dans les exemples des figures 6, 10 et 12, et permettant d'offrir une robustesse de régulation encore meilleure.

[0111] Dans l'exemple de la figure 12, la mesure d'enveloppe est analogue à celle décrite précédemment en regard de la figure 11.

[0112] Dans l'exemple de la figure 6, les traits en pointillés entre les instants de commutation t_2 et t_3 représentent des évolutions typiques de la tension V_p si l'ouverture en le premier instant de commutation t_2 arrive trop tôt ou trop tard, et donnent ainsi une idée de ce qu'il faut

observer : sur/sous tension par rapport à la valeur prédéfinie V_a , dérivée positive ou négative à l'application de la valeur prédéfinie V_a . Dans le cas où le premier instant de commutation t_2 arrive trop tôt, alors la tension V_p est inférieure à la valeur prédéfinie V_a en l'instant suivant de commutation t_3 ; et inversement si le premier instant de commutation t_2 arrive trop tard, alors la tension V_p est supérieure à la valeur prédéfinie V_a en l'instant suivant de commutation t_3 . Ceci est détectable via la mesure d'enveloppe de la tension V_p ou d'une valeur crête de la tension V_p , qui est plus facile à mettre en œuvre qu'une mesure instantanée de la tension V_p en l'instant t_3 .

[0113] De manière analogue, dans les exemples des figures 9 et 10, les traits en pointillés entre les instants de commutation t_0 et t_1 représentent des évolutions typiques de la tension V_p si l'ouverture en l'instant de commutation t_0 arrive trop tôt ou trop tard, et donnent ainsi une idée de ce qu'il faut observer : sur/sous tension par rapport à la valeur prédéfinie V_b , dérivée positive ou négative à l'application de la valeur prédéfinie V_b . Dans le cas où l'instant de commutation t_0 arrive trop tôt, alors la tension V_p est inférieure à la valeur prédéfinie V_b en l'instant suivant de commutation t_1 ; et inversement si l'instant de commutation t_0 arrive trop tard, alors la tension V_p est supérieure à la valeur prédéfinie V_b en l'instant suivant de commutation t_1 . Ceci est détectable via la mesure d'enveloppe de la tension V_p ou d'une valeur crête de la tension V_p , qui est plus facile à mettre en œuvre qu'une mesure instantanée de la tension V_p en l'instant t_1 .

[0114] Dans l'exemple de la figure 6, la deuxième boucle de régulation 72 est mise en œuvre en fonction d'un écart entre la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 et la valeur prédéfinie correspondante, à savoir la valeur V_a pour la deuxième configuration C_2 , et la valeur V_{zvs} pour les troisième et quatrième configurations C_3 , C_4 , lors d'une détection d'évènement(s) au cours d'un cycle de résonance précédent. Dans l'exemple de la figure 6, le bloc de calcul 74 est alors apte à calculer un coefficient correctif α_2 , et le bloc multiplicateur 76 est ensuite apte à multiplier le coefficient correctif α_2 avec la période T du cycle de résonance pour délivrer en sortie la première durée modifiée $\alpha_2.T$, permettant de mettre à jour la première durée de référence Δt_2 .

[0115] Dans l'exemple de la figure 8, la deuxième boucle de régulation 72 est mise en œuvre en fonction d'un écart entre une grandeur de consigne G_{set} , telle qu'une puissance de sortie de consigne, un courant de sortie de consigne, ou encore une tension de sortie de consigne, et une grandeur mesurée G_{mes} correspondante, le bloc de calcul 74 étant alors apte à calculer un coefficient correctif α_4 en fonction de la grandeur de consigne G_{set} et de la grandeur mesurée G_{mes} correspondante, puis le bloc multiplicateur 76 est apte à multiplier ledit coefficient correctif α_4 avec la période T du cycle de résonance pour délivrer en sortie une durée modifiée $\alpha_4.T$, afin de mettre à jour la troisième durée de référence respective Δt_4 .

[0116] L'homme du métier observera d'ailleurs que le troisième instant temporel de commutation t_4 , ainsi que

les instants temporels ultérieurs t_{4*} , permettent de modifier le bilan énergétique du convertisseur 10 sur une période donnée en supposant les valeurs V_a , V_b et V_c fixes. Si le bilan énergétique est positif, alors l'amplitude du courant I_L circulant dans l'élément piézoélectrique 15 augmente, et inversement si le bilan énergétique est négatif, alors l'amplitude du courant I_L diminue. Plus le courant I_L dans l'élément piézoélectrique 15 est élevé, alors plus le courant échangé augmente durant les phases à tension constante (c'est-à-dire les phases à la tension V_a , V_b ou encore V_c). Plus les phases en circuit ouvert (c'est-à-dire les phases à charge sensiblement constante) sont courtes, et plus la puissance convertie augmente. La deuxième boucle de régulation 72 permet alors de réguler la tension de sortie, le courant de sortie, ou encore la puissance de sortie du convertisseur 10 sur une valeur de consigne respective.

[0117] Dans l'exemple de la figure 10, la deuxième boucle de régulation 72 est mise en œuvre en fonction d'un écart entre la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 et la valeur prédéfinie V_b correspondante lors d'une détection d'évènement(s) au cours d'un cycle de résonance précédent. Le bloc de calcul 74 est alors apte à calculer le coefficient correctif α_1 , puis le bloc multiplicateur 76 est apte à multiplier ce coefficient correctif α_1 avec la période T du cycle de résonance pour délivrer en sortie une durée modifiée $\alpha_1.T$, afin de mettre à jour la quatrième durée de référence Δt_1 .

[0118] Dans l'exemple de la figure 12, la deuxième boucle de régulation 72 est mise en œuvre en fonction d'un écart entre la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 et la valeur prédéfinie V_c correspondante, lors d'une détection d'évènement(s) au cours d'un cycle de résonance précédent. Le bloc de calcul 74 est alors apte à calculer un coefficient correctif α_5 en fonction de cet écart, puis le bloc multiplicateur 76 est apte à multiplier ce coefficient correctif α_5 avec la période T du cycle de résonance, pour délivrer en sortie une durée modifiée $\alpha_5.T$, afin de mettre à jour la cinquième durée de référence Δt_5 .

[0119] Le fonctionnement du convertisseur d'énergie électrique 10, et en particulier du dispositif électronique de pilotage 20, selon l'invention va être à présent décrit en regard de la figure 15 représentant un organigramme d'un procédé, selon l'invention, de pilotage du convertisseur d'énergie électrique 10, le procédé étant mis en œuvre par le dispositif électronique de pilotage 20.

[0120] Lors d'une étape initiale 100, le dispositif de pilotage 20 mesure, via son module de mesure 60, la période T du cycle de résonance de l'élément piézoélectrique 15.

[0121] Lors de cette étape de mesure 100, le module de mesure 60 mesure par exemple cette période T du cycle de résonance en détectant deux événements caractéristiques successifs de même type, la période T du cycle de résonance correspondant alors à la durée écoulée entre ces deux événements caractéristiques successifs de même type. Le type d'évènement caractéristique

pour la mesure de la période T du cycle de résonance est typiquement un passage à zéro suivant une monotonie prédéfinie du courant I_L circulant dans l'élément piézoélectrique 15.

[0122] Le dispositif de pilotage 20 passe ensuite à l'étape suivante 110 lors de laquelle il détecte, via son module de détection 62, un événement caractéristique associé au convertisseur d'énergie électrique 10, l'événement caractéristique appartenant à un cycle de résonance courant.

[0123] Lors de cette étape de détection 110, l'événement caractéristique détecté est typiquement choisi parmi le groupe consistant en : un passage à zéro du courant I_L circulant dans l'élément piézoélectrique 15 ; un passage de la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 à une valeur prédéfinie, telle que la valeur V_{ref0} ; un passage à une valeur prédéfinie de la tension entre une borne 30, 34 de l'élément piézoélectrique 15 et un potentiel de référence, tel que le potentiel de la masse électrique 48 ; un passage de la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 à une valeur respective de tension sensiblement constante, telle que la valeur V_a , V_b , V_c ; un passage de la tension entre la borne 30, 34 de l'élément piézoélectrique et le potentiel de référence, tel que la masse électrique 48, à une valeur respective de tension sensiblement constante ; et un passage à une valeur de déformation de référence l'élément piézoélectrique 15, telle qu'une valeur de déformation mesurée via une électrode séparée disposée contre l'élément piézoélectrique 15 et une mesure de la tension /des charges sur ladite électrode.

[0124] A l'issue de cette étape de détection 110, le dispositif de pilotage 20 calcule, via son module de calcul 66 et lors de l'étape suivante 120, au moins trois instants temporels ultérieurs de commutation lors d'au moins un cycle de résonance subséquent, à savoir le premier instant temporel ultérieur t_2^* correspondant à l'ouverture du premier interrupteur K_1 , le deuxième instant temporel ultérieur t_3^* , t_{3b}^* correspondant à la fermeture du deuxième interrupteur K_2 et le troisième instant temporel ultérieur t_4^* correspondant à l'ouverture du deuxième interrupteur K_2 , chaque instant temporel ultérieur de commutation étant calculé à partir d'un événement caractéristique respectif.

[0125] Lors de cette étape de calcul 120, le module de calcul 66 calcule optionnellement en outre le quatrième instant temporel ultérieur t_1^* correspondant à la fermeture du premier interrupteur K_1 .

[0126] En complément facultatif, lorsque le convertisseur d'énergie électrique 10 comporte trois interrupteurs, et alors en outre le troisième interrupteur K_3 , le module de calcul 66 calcule optionnellement en outre le cinquième instant temporel ultérieur t_5^* correspondant à la fermeture du troisième interrupteur K_3 , et également le sixième instant temporel ultérieur t_0^* correspondant à l'ouverture du troisième interrupteur K_3 .

[0127] Lors de cette étape de calcul 120, le module de calcul 70 calcule de préférence les instants temporels

ultérieurs t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* , t_1^* , t_5^* , t_0^* lors de plusieurs cycles de résonance subséquents successifs, les instants temporels ultérieurs t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* , t_1^* , t_5^* , t_0^* étant alors calculés pour chacun desdits cycles subséquents successifs.

[0128] Lors de cette étape de calcul 120, chaque instant temporel ultérieur calculé t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* , t_1^* , t_5^* , t_0^* dépend typiquement de l'écart temporel $K \cdot T$ égal à K fois la période T du cycle de résonance de l'élément piézoélectrique, K étant un nombre entier de valeur supérieure ou égale à 1, et de préférence de valeur supérieure à 2. La valeur du nombre K est déterminée en fonction de la durée de la période T du cycle de résonance, et plus la durée de ladite période T du cycle de résonance est courte, plus la valeur du nombre K est élevée.

[0129] Dans l'exemple de la figure 6, le premier instant temporel ultérieur de commutation t_2^* correspond à l'instant $3T+t_2$, et l'événement détecté est le passage à zéro du courant I_L circulant dans l'élément piézoélectrique 15 en l'instant $2T+t_0$. Dans cet exemple, la valeur de K est alors égale à 1. Par ailleurs, la deuxième boucle de régulation 72 est mise en œuvre par rapport au deuxième instant temporel de commutation t_3 , c'est-à-dire afin de réguler une erreur de mesure autour du deuxième instant temporel de commutation t_3 .

[0130] Dans l'exemple de la figure 7, le deuxième instant temporel ultérieur de commutation t_3^* correspond à l'instant $2T+t_3$, et l'événement détecté associé est le passage à zéro du courant I_L en l'instant temporel $T+t_0$, ceci pour la deuxième configuration C2. Pour les troisième et quatrième configurations C3, C4, le deuxième instant temporel ultérieur de commutation t_{3b}^* correspond à l'instant $2T+t_{3b}$, et l'événement caractéristique associé est également le passage à zéro du courant I_L en l'instant temporel $T+t_0$. Dans cet exemple, la valeur de K est égale à 1.

[0131] Dans l'exemple de la figure 8, le troisième instant temporel ultérieur de commutation t_4^* correspond à l'instant $2T+t_4$, et l'événement caractéristique associé est le passage à zéro du courant I_L en l'instant $T+t_0$. Dans cet exemple, la valeur de K est égale à 1.

[0132] Dans l'exemple de la figure 9, le quatrième instant temporel ultérieur de commutation t_1^* correspond à l'instant $3T+t_1$, et l'événement caractéristique associé est le passage à la valeur V_b de la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 en l'instant $T+t_1$. Dans cet exemple, la valeur de K est égale à 2. Dans cet exemple de la figure 9, la première boucle de régulation 70 est également mise en œuvre par rapport au quatrième instant temporel de commutation t_1 .

[0133] Dans l'exemple de la figure 10, le quatrième instant temporel ultérieur de commutation t_1^* correspond à l'instant $3T+t_1$, et l'événement caractéristique associé est le passage à zéro du courant I_L en l'instant $T+t_0$. Dans cet exemple, la valeur de K est égale à 2. Dans l'exemple de la figure 10, la deuxième boucle de régulation 74 est mise en œuvre par rapport au quatrième instant temporel de commutation t_1 , c'est-à-dire afin de réguler une erreur

de mesure autour du quatrième instant temporel de commutation t_1 .

[0134] Dans l'exemple des figures 11 et 12, le cinquième instant temporel ultérieur de commutation t_5 est l'instant $3T + t_5$, et l'évènement caractéristique associé est le passage à la valeur V_c de la tension V_p en l'instant $T + t_5$ dans l'exemple de la figure 11, la valeur de K étant égale à 2 ; l'évènement caractéristique associé étant le passage à zéro du courant I_L en l'instant $2T + t_0$ dans l'exemple de la figure 12, la valeur de K étant alors égale à 1. Dans l'exemple de la figure 11, la première boucle de régulation 70 est mise en œuvre en l'instant temporel t_5 , et dans l'exemple de la figure 12, la deuxième boucle de régulation 72 est mise en œuvre en l'instant temporel t_5 .

[0135] Dans l'exemple des figures 13 et 14, le sixième instant temporel ultérieur de commutation t_0^* est l'instant $4T + t_0$, et l'évènement caractéristique associé est le passage à zéro du courant I_L en l'instant temporel $2T + t_0$ dans l'exemple de la figure 13, la valeur de K étant égale à 2 ; l'évènement caractéristique associé étant le passage à la valeur de référence V_{ref0} de la tension V_p aux bornes de l'élément piézoélectrique 15 dans l'exemple de la figure 14. Dans l'exemple de la figure 13, la première boucle de régulation 70 est mise en œuvre par rapport à l'instant temporel $T + t_0$, afin de réguler la durée de comparaison t_{comp0} associée au comparateur détectant le passage à zéro du courant I_L .

[0136] Dans les exemples des figures 6 à 13, la valeur de K est égale à 1 ou 2, ceci notamment par souci de simplification des dessins, et l'homme du métier comprendra bien entendu que la valeur de K est également susceptible de prendre des valeurs supérieures ou égales à 3, ceci afin de calculer encore davantage en anticipation les instants temporels ultérieurs de commutation t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* , t_1^* , t_5^* , t_a^* .

[0137] Dans l'exemple de la figure 14, une troisième boucle de régulation 80 agit directement sur le délai t_{regul0} correspondant au délai entre, d'une part, le résultat de la comparaison de la tension V_p avec la tension de référence V_{ref0} , et d'autre part, la commande d'ouverture du troisième interrupteur K_3 . La troisième boucle de régulation 80 est par exemple apte à réguler la valeur du dépassement en tension qui fait suite à l'ouverture du troisième interrupteur K_3 à la sortie de la phase à tension sensiblement constante à la valeur V_c . La troisième boucle de régulation 80 est alors apte à réguler la durée t_{regul0} de sorte à obtenir la valeur de dépassement souhaitée sur la tension V_p , cette valeur de dépassement ne devant être ni trop élevée pour limiter les pertes, ni trop faible pour être mesurable sans trop de bruit, cette valeur de dépassement étant par exemple comprise entre 100 mV et la tension V_{max} divisée par 10.

[0138] Dans l'exemple de la figure 14, la tension de référence V_{ref0} est par exemple comprise entre la valeur V_c et la valeur V_b par laquelle la tension V_p est censée passer en sortie de la phase à tension sensiblement constante à la valeur V_c qui est mise en œuvre juste avant. La probabilité de détection du passage par la ten-

sion de référence V_{ref0} de la tension V_p est ainsi augmentée.

[0139] En complément, la durée t_{regul0} est bornée entre une valeur minimale et une valeur maximale ce qui permet une poursuite de la commande du convertisseur 10, notamment durant le démarrage où des détections peuvent être manquées. L'écart entre les valeurs maximale et minimale associées à la durée t_{regul0} est de préférence limité à la période T du cycle de résonance afin d'avoir une solution unique de détection, et l'écart entre les valeurs maximale et minimale où un coefficient de régulation a_{regul0} destiné à être multiplié avec la période T du cycle de résonance pour mettre à jour la valeur de la durée t_{regul0} est également inférieur à 1.

[0140] A l'issue de l'étape de calcul 120, le dispositif de pilotage 20 commande alors, lors de l'étape suivante 130 et via son module de commande 64, la commutation des premier et deuxième interrupteurs K_1 , K_2 respectifs en chacun des premier, deuxième et troisième instants temporels ultérieurs t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* calculés, voire en outre la fermeture du premier interrupteur K_1 en le quatrième instant temporel ultérieur t_1^* calculé.

[0141] En complément facultatif, lorsque le convertisseur d'énergie électrique 10 comporte trois interrupteurs, et alors en outre le troisième interrupteur K_3 , le module de commande 64 commande alors la commutation du troisième interrupteur K_3 en chacun des cinquième et sixième instants temporels ultérieurs t_5^* , t_0^* calculés.

[0142] Lors de l'étape de commande 130, les signaux de commande des interrupteurs K_1 , K_2 , K_3 respectifs sont de préférence envoyés, par le module de commande 64, en des instants temporels d'émission t_{e2} , t_{e3} , t_{e3b} , t_{e4} , t_{e1} , t_{e5} , t_{e0} respectifs précédant l'instant temporel ultérieur calculé t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* , t_1^* , t_5^* , t_0^* respectif de la durée de commutation propre audit interrupteur respectif, ceci afin que la commutation effective de l'interrupteur respectif soit mieux synchronisée avec l'instant temporel ultérieur t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* , t_1^* , t_5^* , t_0^* respectif calculé, la durée de commutation de l'interrupteur respectif étant la durée nécessaire à l'interrupteur pour effectuer ladite commutation à partir du moment où il a reçu le signal de commande correspondant de la part du module de commande 64, cette durée de commutation incluant typiquement des délais de propagation de la commande au travers d'un bus de communication et/ou d'une interface d'isolation galvanique et/ou d'un driver de transistor et/ou de portes logiques et/ou de dispositifs de protection.

[0143] En complément, chacune des durées calculées/corrigées T , ΔT_i , $\alpha_i T$, t_{comp_i} , t_{regul_i} , avec i compris entre 0 et 6, sont aptes à être bornées de sorte à assurer un pilotage, même non optimal, des interrupteurs K_1 , K_2 , K_3 respectifs, dans le cas où certaines détections/mesures présentent des erreurs. De telles erreurs peuvent par exemple être présentes lors du démarrage du convertisseur 10, lorsque les tensions et/ou courants ne sont pas encore bien établis.

[0144] Un certain nombre d'exemples de réalisation et de topologies du convertisseur 10 ont été présentés en

regard des figures 1 à 5, et ce pour différentes configurations de conversions, à savoir abaisseur de tension, élévateur de tension, fortement abaisseur de tension et variante d'abaisseur de tension. L'homme du métier comprendra néanmoins que l'invention ne se limite pas à ces topologies, et que l'invention concerne notamment aussi les topologies décrites dans les documents FR 3 064 850 B1, FR 3 086 471 A1 et FR 3 086 472 A1, notamment celles décrites en regard de la figure 19 ou de la figure 20 du document FR 3 086 472 A1. Ces différentes topologies permettent alors de choisir les valeurs prédéfinies V_a , V_b et V_c parmi les tensions : 0 ; V_{in} ; $-V_{in}$; V_{out} ; $-V_{out}$; $V_{in}-V_{out}$; $V_{out}-V_{in}$; $V_{in}+V_{out}$; et $-V_{in}-V_{out}$.

[0145] En outre, l'homme du métier comprendra également que l'invention ne se limite pas aux trois paliers de tension aux valeurs prédéfinies V_a , V_b et V_c , et que l'invention concerne notamment aussi un fonctionnement du convertisseur 10 avec un palier de tension supplémentaire, tel que décrit par exemple en regard des figures 17 et 18 du document FR 3 086 472 A1.

[0146] Ainsi, avec le dispositif électronique de pilotage 20 selon l'invention, les instants temporels ultérieurs de commutation t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* , t_1^* , voire en complément facultatif t_5^* , t_0^* , des interrupteurs K_1 , K_2 , voire K_3 , sont alors calculés en anticipation pour un ou plusieurs cycles de résonance subséquent(s), postérieur(s) au cycle de résonance courant comportant le ou les événements caractéristiques associés à partir duquel ces instants temporels ultérieurs de commutations (t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* , t_1^* , t_5^* , t_0^*) sont calculés.

[0147] Le dispositif de pilotage 20 selon l'invention permet alors d'avoir un fonctionnement adapté du convertisseur 10 avec des commutations des interrupteurs K_1 , K_2 , K_3 aux instants temporels appropriés, et ceci même pour une fréquence élevée de fonctionnement du convertisseur 10, telle qu'une fréquence supérieure à 1 MHz. La fréquence de fonctionnement du convertisseur 10 est égale à l'inverse de la période T du cycle de résonance.

[0148] On conçoit ainsi que le dispositif électronique de pilotage 20 et le procédé de pilotage selon l'invention permettent d'offrir un pilotage amélioré du convertisseur d'énergie électrique 10, notamment à fréquence de fonctionnement élevée dudit convertisseur, typiquement au-delà de 1 MHz.

Revendications

1. Dispositif électronique (20) de pilotage d'un convertisseur d'énergie électrique (10), le convertisseur comportant un élément piézoélectrique (15) et plusieurs interrupteurs (K_1 , K_2 , K_3) aptes à être commandés pour alterner des phases (II, IV, VI) à tension sensiblement constante aux bornes (30, 34) de l'élément piézoélectrique (15) et des phases (I, III, V) à charge sensiblement constante aux bornes (30, 34) dudit élément piézoélectrique (15),

le dispositif électronique de pilotage (20) comprenant :

- un module de mesure (60) configuré pour mesurer une période (T) d'un cycle de résonance de l'élément piézoélectrique (15) ;
- un module de détection (62) configuré pour détecter au moins un événement caractéristique associé au convertisseur d'énergie électrique (10), l'au moins un événement caractéristique appartenant à un cycle de résonance courant ;
- un module de commande (64) configuré pour commander une commutation de chacun des interrupteurs (K_1 , K_2 , K_3) ;

caractérisé en ce qu'il comprend en outre :

- un module de calcul (66) configuré pour calculer au moins trois instants temporels ultérieurs de commutation (t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* , t_1^* , t_5^* , t_0^*) lors d'au moins un cycle de résonance subséquent, chaque cycle de résonance subséquent étant postérieur au cycle de résonance courant, chaque instant temporel ultérieur de commutation (t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* , t_1^* , t_5^* , t_0^*) étant calculé à partir d'un événement caractéristique respectif, un premier instant temporel ultérieur (t_2^*) correspondant à l'ouverture d'un premier interrupteur (K_1), un deuxième instant temporel ultérieur (t_3^* , t_{3b}^*) correspondant à la fermeture d'un deuxième interrupteur (K_2) et un troisième instant temporel ultérieur (t_4^*) correspondant à l'ouverture du deuxième interrupteur (K_2), et

le module de commande (64) étant configuré pour commander la commutation de l'interrupteur (K_1 , K_2 , K_3) respectif en chacun des instant temporels ultérieurs (t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* , t_1^* , t_5^* , t_0^*) calculés.

2. Dispositif (20) selon la revendication 1, dans lequel le nombre total de phases à tension sensiblement constante (II, IV, VI) aux bornes (30, 34) de l'élément piézoélectrique (15) et à charge sensiblement constante (I, III, V) aux bornes (30, 34) dudit élément piézoélectrique (15) au cours d'un cycle de résonance respectif est supérieur ou égal à 6.

3. Dispositif (20) selon la revendication 1 ou 2, dans lequel chaque événement caractéristique est choisi parmi le groupe consistant en : un passage à zéro du courant (I_L) circulant dans l'élément piézoélectrique (15), un passage à une valeur prédéfinie (V_{ref0}) de la tension (V_p) aux bornes (30, 34) de l'élément piézoélectrique (15), un passage à une valeur pré-

- définie de la tension entre une borne de l'élément piézoélectrique (15) et un potentiel de référence, un passage à une valeur respective de tension sensiblement constante (V_a , V_b , V_c) de la tension (V_p) aux bornes (30, 34) de l'élément piézoélectrique (15), un passage à une valeur respective de tension sensiblement constante de la tension entre la borne de l'élément piézoélectrique (15) et le potentiel de référence, et un passage à une valeur de déformation de référence, telle qu'une valeur de déformation mesurée via une électrode séparée disposée contre l'élément piézoélectrique (15).
4. Dispositif (20) selon la revendication 3, dans lequel l'événement caractéristique associé aux premier, deuxième et troisième instants temporels ultérieurs (t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^*) est le passage à zéro du courant (I_L) circulant dans l'élément piézoélectrique (15) ; l'événement caractéristique étant de préférence le passage à zéro et en décroissant dudit courant (I_L).
 5. Dispositif (20) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel chaque instant temporel ultérieur (t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* , t_1^* , t_5^* , t_0^*) calculé dépend d'un écart temporel égal à K fois la période (T) du cycle de résonance de l'élément piézoélectrique (15), K étant un nombre entier de valeur supérieure ou égale à 1.
 6. Dispositif (20) selon la revendication 5, dans lequel la valeur du nombre K est déterminée en fonction de la durée de la période (T) du cycle de résonance, et plus la durée de ladite période (T) est courte, plus la valeur du nombre K est élevée ; la valeur du nombre K étant de préférence supérieure à 2.
 7. Dispositif (20) selon la revendication 5 ou 6, dans lequel chacun des premier, deuxième et troisième instants temporels ultérieurs (t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^*) est égal, à partir l'événement caractéristique, à la somme de l'écart temporel (KT) et d'une durée de référence (Δt_2 , Δt_3 , Δt_{3b} , Δt_4) respective ; chaque durée de référence (Δt_2 , Δt_3 , Δt_{3b} , Δt_4) respective étant de préférence déterminée à partir de l'instant temporel de commutation (t_2 , t_3 , t_{3b} , t_4) correspondant lors du cycle de résonance courant ou à partir de la période (T) du cycle de résonance.
 8. Dispositif (20) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le module de commande (64) est, pour la commande de commutation d'un interrupteur (K_1 , K_2 , K_3) respectif, configuré pour envoyer un signal de commande audit interrupteur (K_1 , K_2 , K_3) en un instant temporel d'émission (t_{e2} , t_{e3} , t_{e3b} , t_{e4} , t_{e1} , t_{e5} , t_{e0}) respectif, chaque instant temporel d'émission (t_{e2} , t_{e3} , t_{e3b} , t_{e4} , t_{e1} , t_{e5} , t_{e0}) étant égal à l'instant temporel ultérieur de commutation (t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* , t_1^* , t_5^* , t_0^*) respectif moins une durée de commutation (t_{o2} , t_{e3} , t_{o4} , t_{c1} , t_{c5} , t_{o0}) propre audit interrupteur (K_1 , K_2 , K_3), la durée de commutation (t_{o2} , t_{e3} , t_{o4} , t_{c1} , t_{c5} , t_{o0}) étant une durée nécessaire à l'interrupteur (K_1 , K_2 , K_3) pour effectuer ladite commutation à partir du moment où il a reçu le signal de commande correspondant, la durée de commutation (t_{o2} , t_{e3} , t_{o4} , t_{c1} , t_{c5} , t_{o0}) incluant de préférence un délai de propagation du signal de commande correspondant au travers d'un bus de communication et/ou d'une interface d'isolation galvanique et/ou d'un driver de transistor et/ou de portes logiques et/ou de dispositifs de protection ; une durée de commutation en ouverture (t_o) et une durée de commutation en fermeture (t_c) étant de préférence prédéfinies pour chaque interrupteur (K_1 , K_2 , K_3).
 9. Dispositif (20) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le module de calcul (66) est configuré pour calculer les instants temporels ultérieurs (t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* , t_1^* , t_5^* , t_0^*) lors de plusieurs cycles de résonance subséquents successifs, les au moins trois instants temporels ultérieurs (t_2^* , t_3^* , t_{3b}^* , t_4^* , t_1^* , t_5^* , t_0^*) étant calculés pour chacun desdits cycles subséquents successifs.
 10. Dispositif (20) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le module de calcul (66) est configuré pour calculer en outre un quatrième instant temporel ultérieur (t_1^*) correspondant à la fermeture du premier interrupteur (K_1).
 11. Dispositif (20) selon la revendication 10, dans lequel l'événement caractéristique associé au quatrième instant temporel ultérieur (t_1^*) est le passage à une valeur respective de tension sensiblement constante (V_b) de la tension (V_p) aux bornes (30, 34) de l'élément piézoélectrique (15) ou bien le passage à zéro du courant (I_L) circulant dans l'élément piézoélectrique (15).
 12. Dispositif (20) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le convertisseur (10) comporte trois interrupteurs (K_1 , K_2 , K_3) aptes à être commandés pour alterner des phases (II, IV, VI) à tension sensiblement constante aux bornes (30, 34) de l'élément piézoélectrique (15) et des phases (I, III, V) à charge sensiblement constante aux bornes (30, 34) dudit élément piézoélectrique (15), et dans lequel le module de calcul (66) est configuré pour calculer en outre un cinquième instant temporel ultérieur (t_5^*) correspondant à la fermeture d'un troisième interrupteur (K_3).
 13. Dispositif (20) selon la revendication 12, dans lequel

l'événement caractéristique associé au cinquième instant temporel ultérieur (t_{5^+}) est le passage à une valeur respective de tension sensiblement constante (V_c) de la tension (V_p) aux bornes (30, 34) de l'élément piézoélectrique (15) ou bien le passage à zéro du courant (I_L) circulant dans l'élément piézoélectrique (15).

14. Dispositif (20) selon la revendication 12 ou 13, dans lequel le module de calcul (66) est configuré pour calculer en outre un sixième instant temporel ultérieur (t_{6^+}) correspondant à l'ouverture du troisième interrupteur (K_3). 10
15. Dispositif (20) selon la revendication 14, dans lequel l'événement caractéristique associé au sixième instant temporel ultérieur (t_{6^+}) est le passage à zéro du courant (I_L) circulant dans l'élément piézoélectrique (15) ou bien le passage à une valeur prédéfinie (V_{ref0}) de la tension (V_p) aux bornes (30, 34) de l'élément piézoélectrique (15). 15 20
16. Dispositif (20) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le module de mesure (60) est configuré pour mesurer la période (T) du cycle de résonance en détectant deux événements caractéristiques successifs de même type, la période (T) du cycle de résonance correspond à la durée écoulée entre les deux événements caractéristiques successifs ; 25 30
ledit type de l'événement caractéristique étant de préférence un passage à zéro suivant une monotonie prédéfinie d'un courant (I_L) circulant dans l'élément piézoélectrique (15). 35
17. Système électronique de conversion d'énergie électrique (5) comprenant : 40
- un convertisseur d'énergie électrique (10) comportant un élément piézoélectrique (15) et plusieurs interrupteurs (K_1 , K_2 , K_3) aptes à être commandés pour alterner des phases (II, IV, VI) à tension sensiblement constante aux bornes (30, 34) de l'élément piézoélectrique (15) et des phases (I, III, V) à charge sensiblement constante aux bornes (30, 34) dudit élément piézoélectrique (15) ; et 45
- un dispositif électronique (20) de pilotage du convertisseur d'énergie électrique (10) ;
caractérisé en ce que le dispositif de pilotage (20) est selon l'une quelconque des revendications précédentes. 50
18. Système (5) selon la revendication 17, dans lequel le système électronique de conversion d'énergie électrique (5) est un système de conversion en une énergie électrique continue, tel qu'un système de conversion continu-continu ou un système de con-

version alternatif-continu.

19. Procédé de pilotage d'un convertisseur d'énergie électrique (10), le convertisseur (10) comportant un élément piézoélectrique (15) et plusieurs interrupteurs (K_1 , K_2 , K_3) aptes à être commandés pour alterner des phases (II, IV, VI) à tension sensiblement constante aux bornes (30, 34) de l'élément piézoélectrique (15) et des phases (I, III, V) à charge sensiblement constante aux bornes (30, 34) dudit élément piézoélectrique (15), 5

le procédé étant mis en œuvre par un dispositif électronique de pilotage (20) et comprenant les étapes suivantes :

- mesure (100) d'une période (T) d'un cycle de résonance de l'élément piézoélectrique (15) ;
- détection (110) d'un événement caractéristique associé au convertisseur d'énergie électrique (10), l'événement caractéristique appartenant à un cycle de résonance courant ; et
- commande (130) d'une commutation de chacun des interrupteurs (K_1 , K_2 , K_3) ;

caractérisé en ce qu'il comprend en outre l'étape suivante :

- calcul (120) d'au moins trois instants temporels ultérieurs de commutation (t_{2^+} , t_{3^+} , t_{3b^+} , t_{4^+} , t_{1^+} , t_{5^+} , t_{0^+}) lors d'au moins un cycle de résonance subséquent, chaque cycle de résonance subséquent étant postérieur au cycle de résonance courant, chaque instant temporel ultérieur de commutation (t_{2^+} , t_{3^+} , t_{3b^+} , t_{4^+} , t_{1^+} , t_{5^+} , t_{0^+}) étant calculé à partir d'un événement caractéristique respectif, un premier instant temporel ultérieur (t_{2^+}) correspondant à l'ouverture d'un premier interrupteur (K_1), un deuxième instant temporel ultérieur (t_{3^+} , t_{3b^+}) correspondant à la fermeture d'un deuxième interrupteur (K_2) et un troisième instant temporel ultérieur (t_{4^+}) correspondant à l'ouverture du deuxième interrupteur (K_2), 35

l'étape de commande (130) comportant une commande de la commutation de l'interrupteur (K_1 , K_2 , K_3) respectif en chacun des instants temporels ultérieurs (t_{2^+} , t_{3^+} , t_{3b^+} , t_{4^+} , t_{1^+} , t_{5^+} , t_{0^+}) calculés.

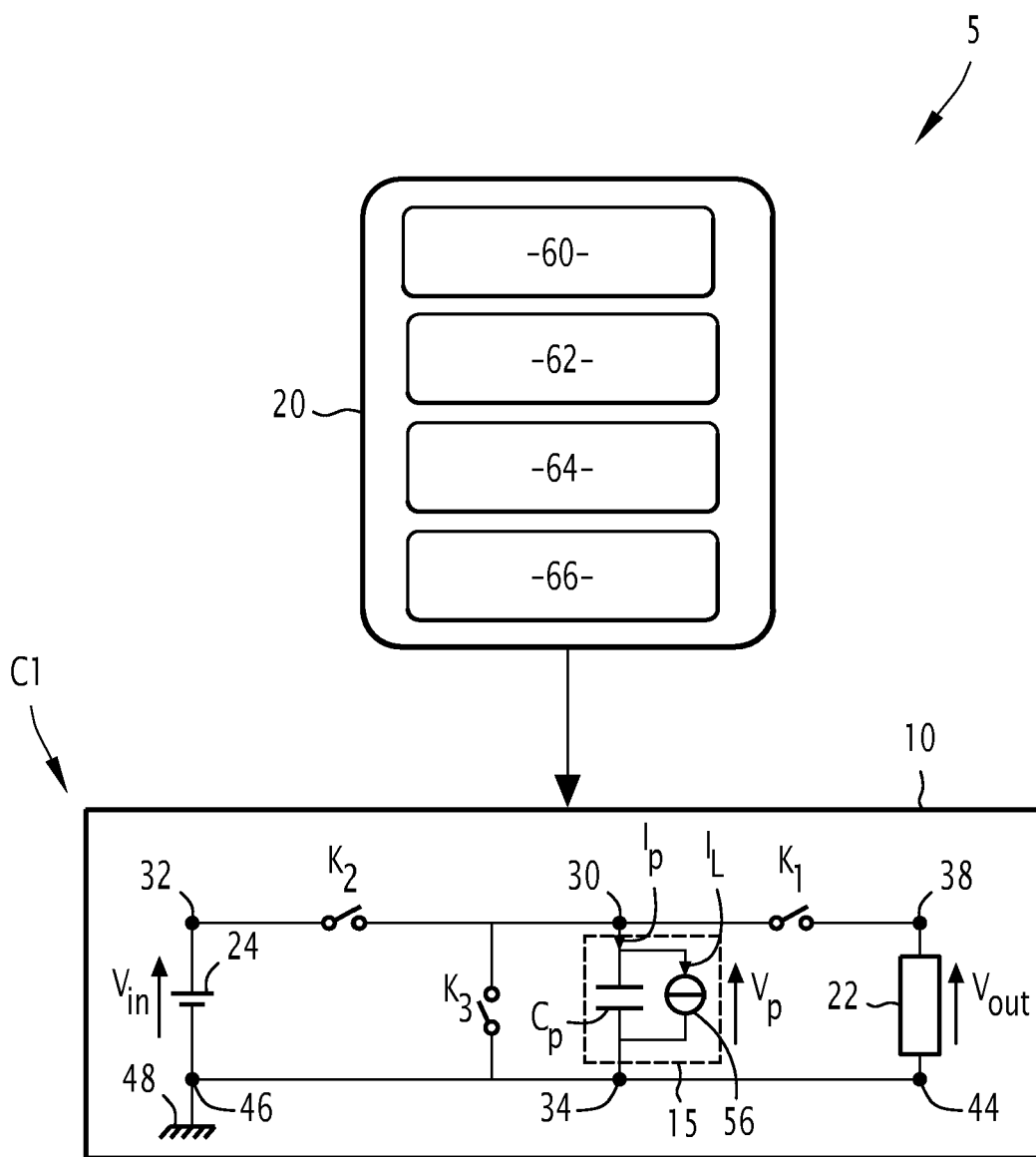
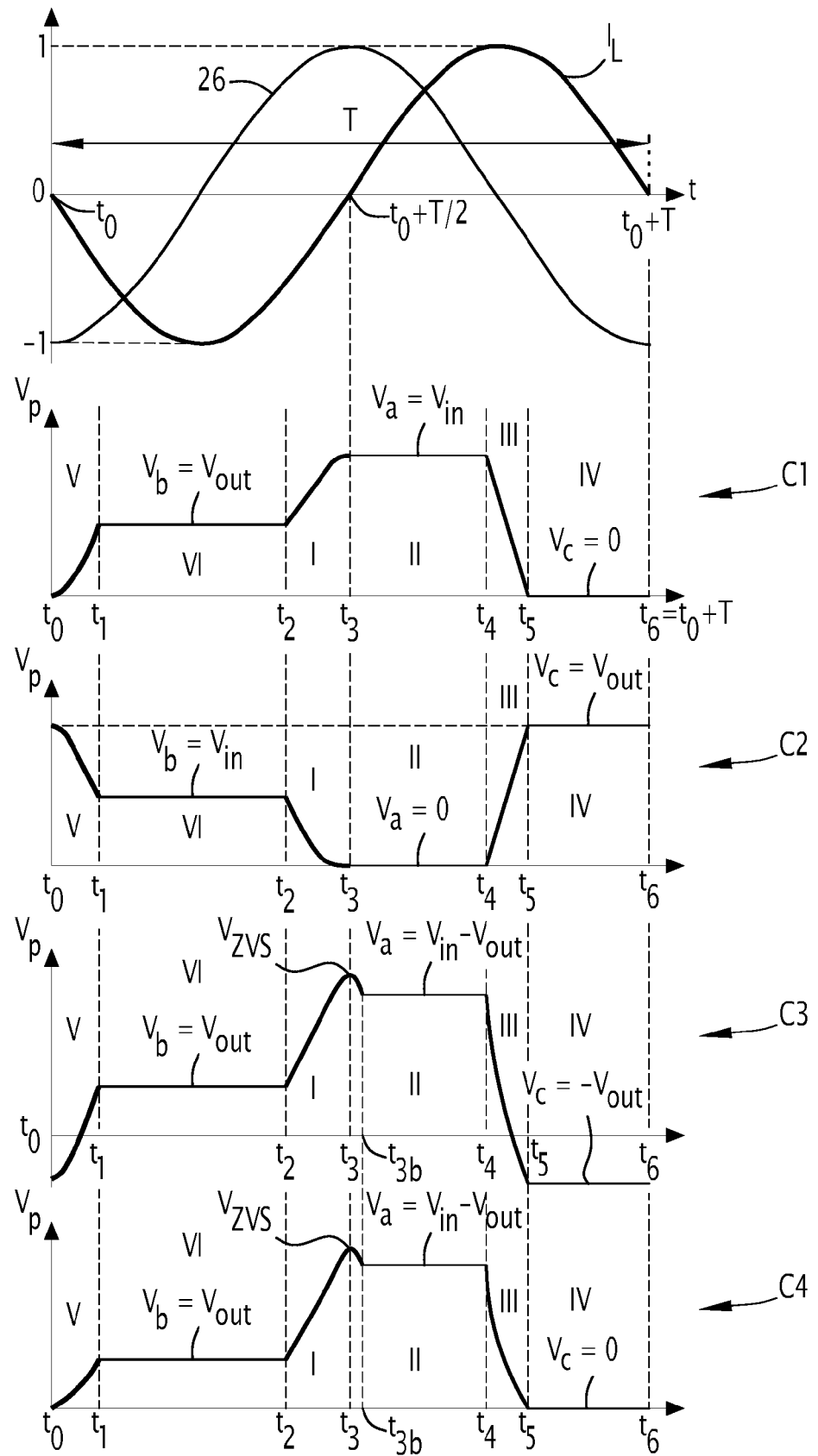


FIG.1

FIG.2

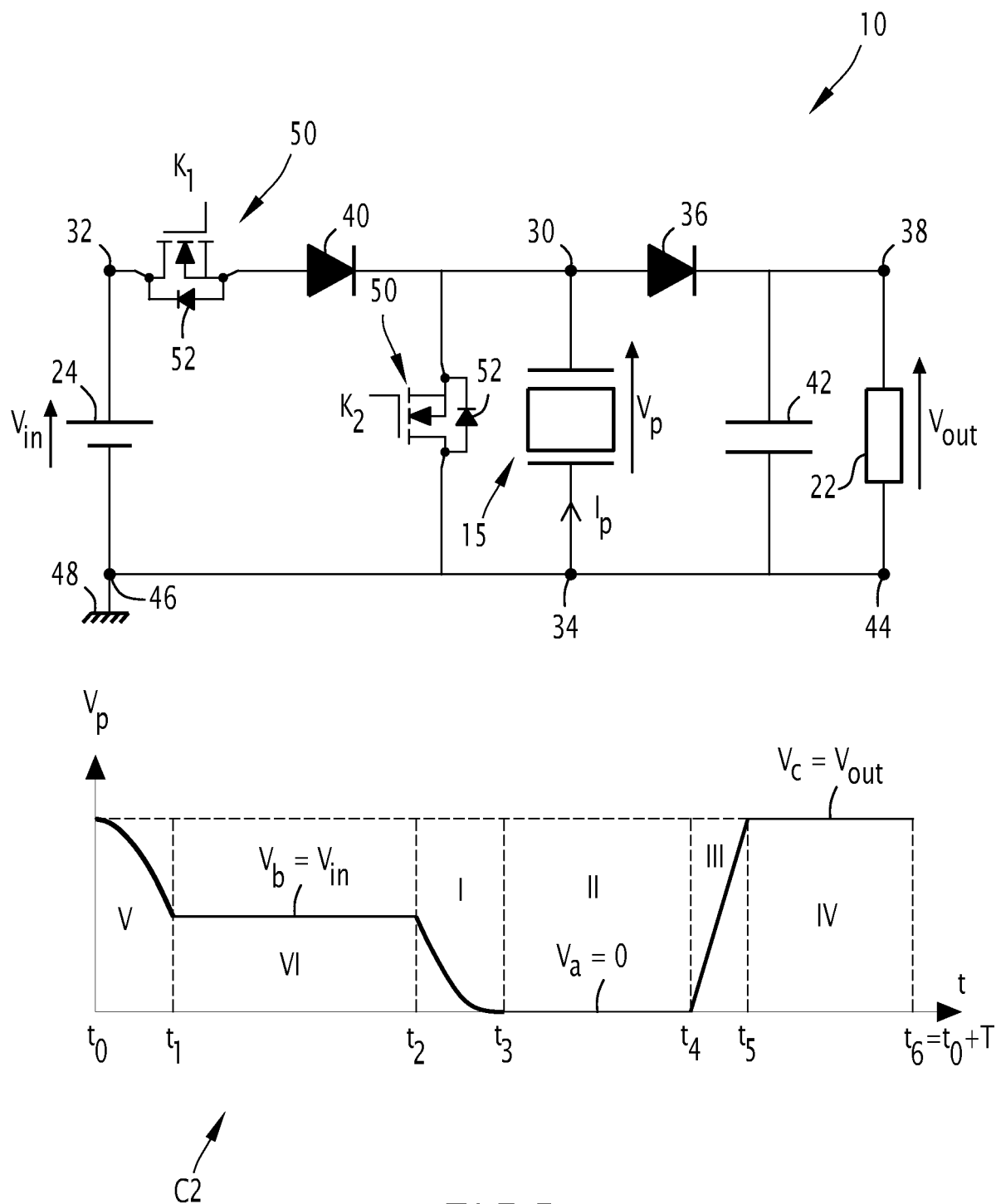


FIG.3

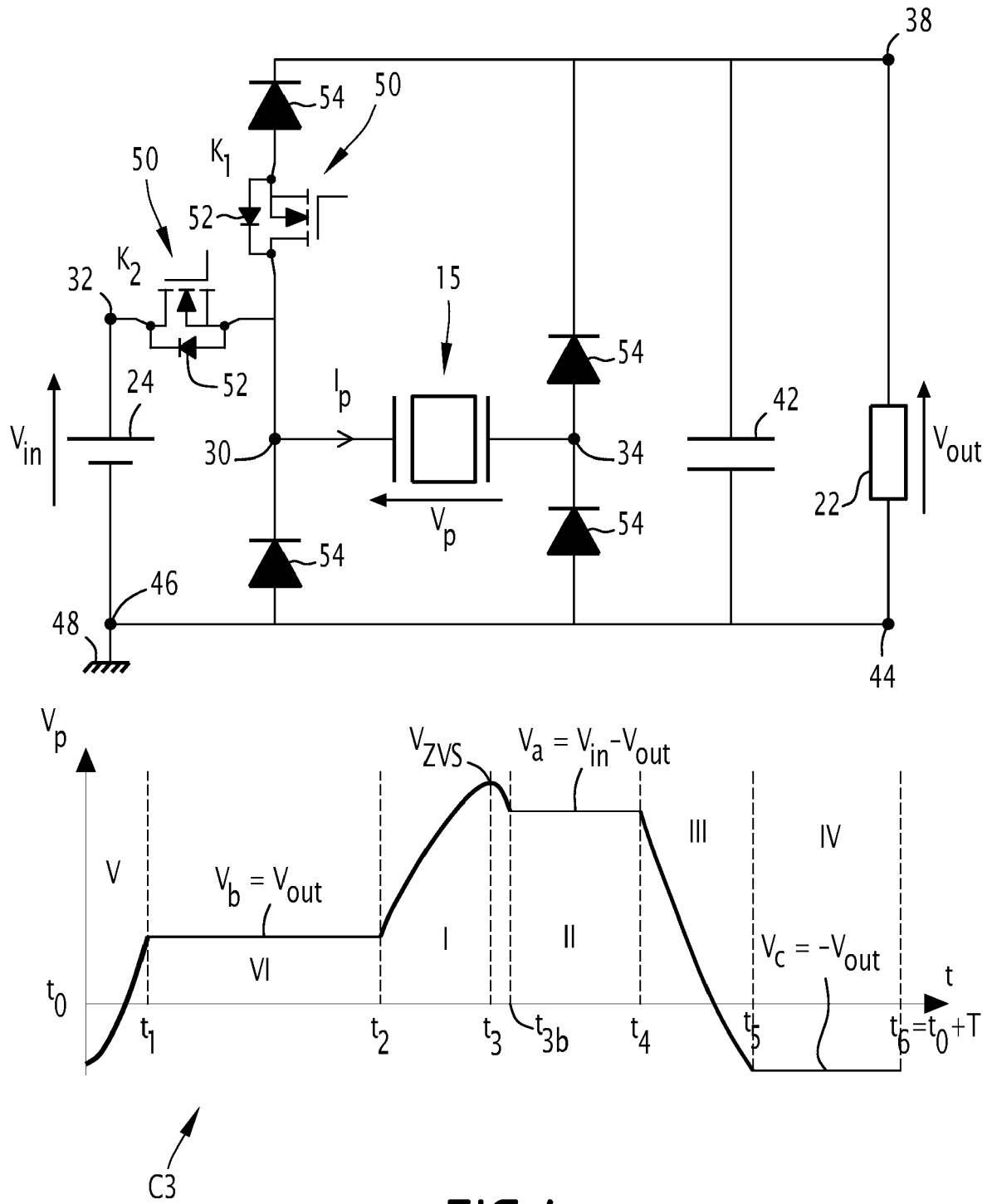
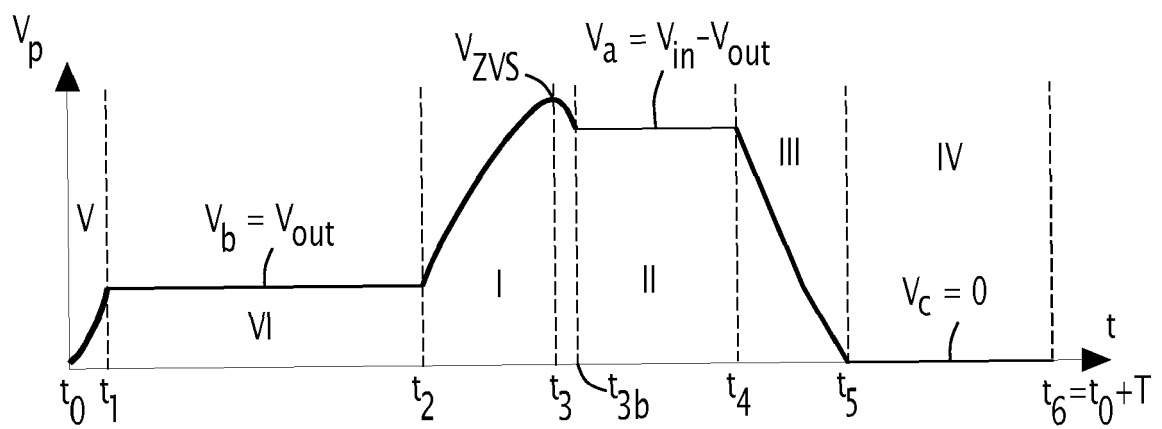
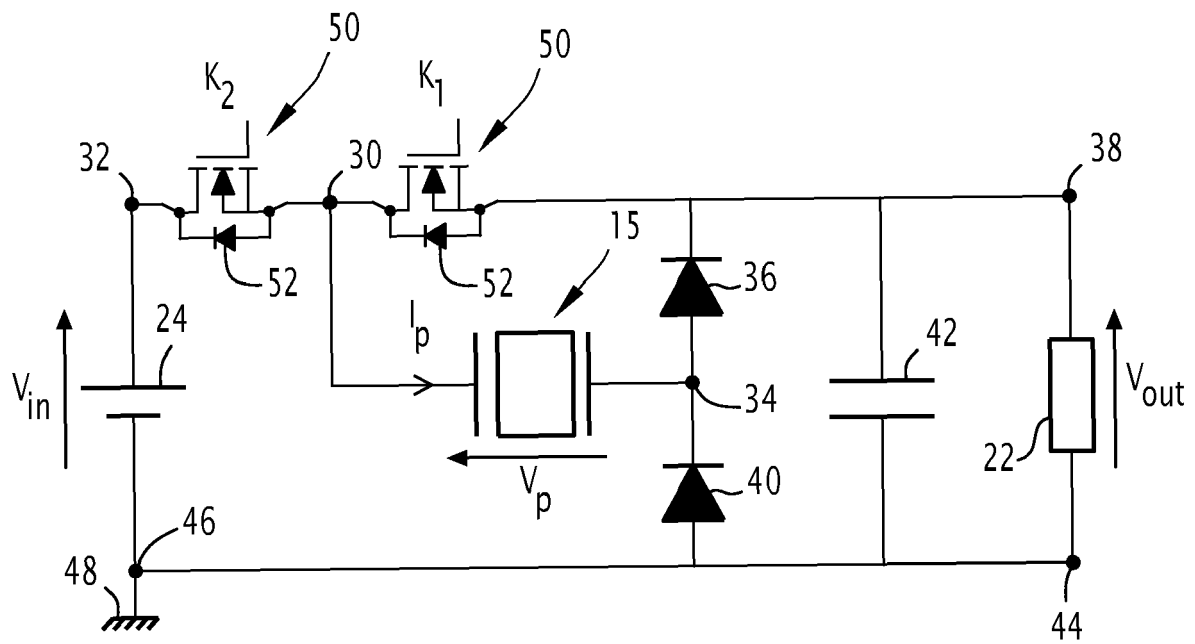


FIG.4



C4

FIG.5

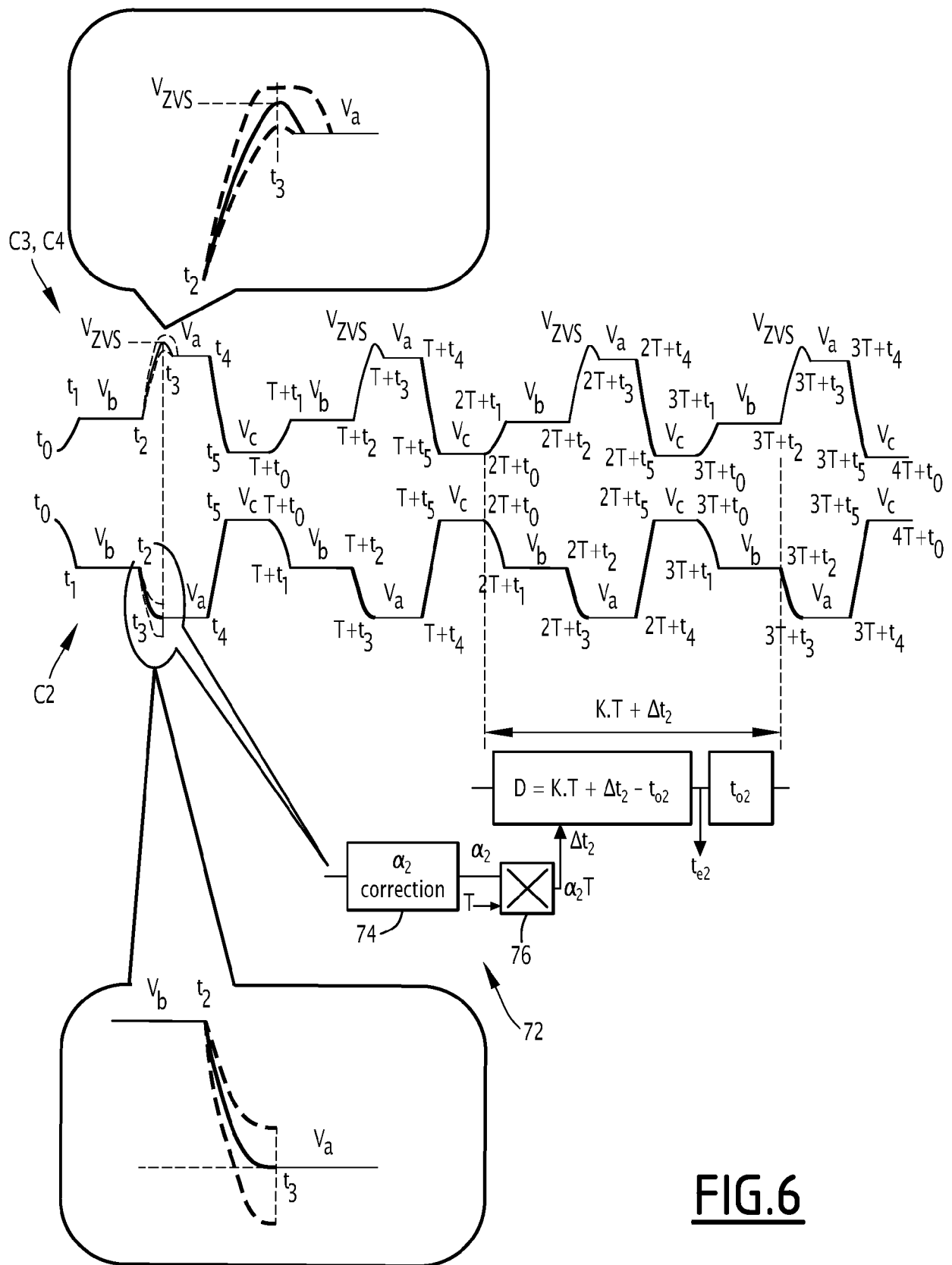


FIG. 6

FIG. 7

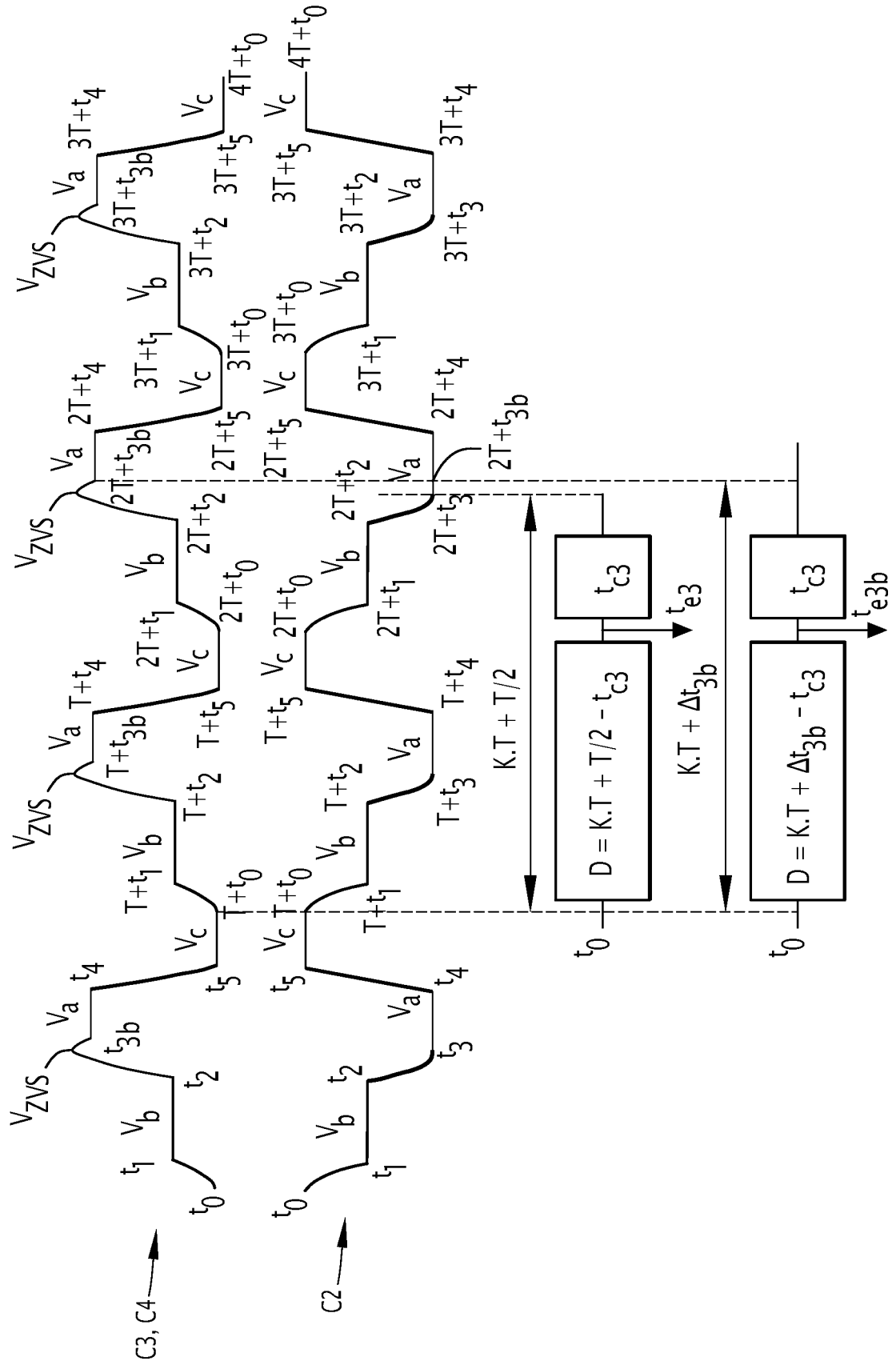
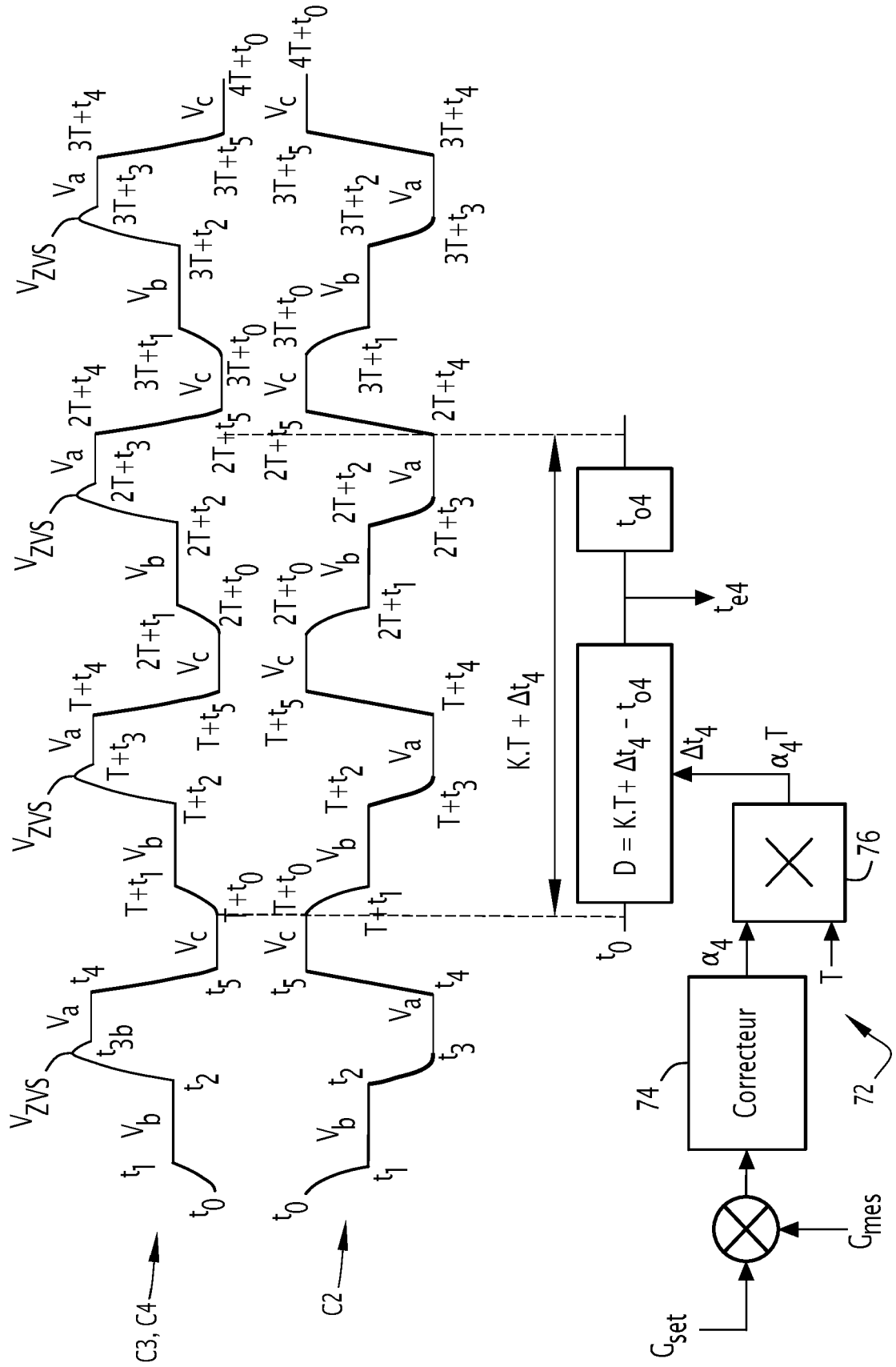


FIG.8

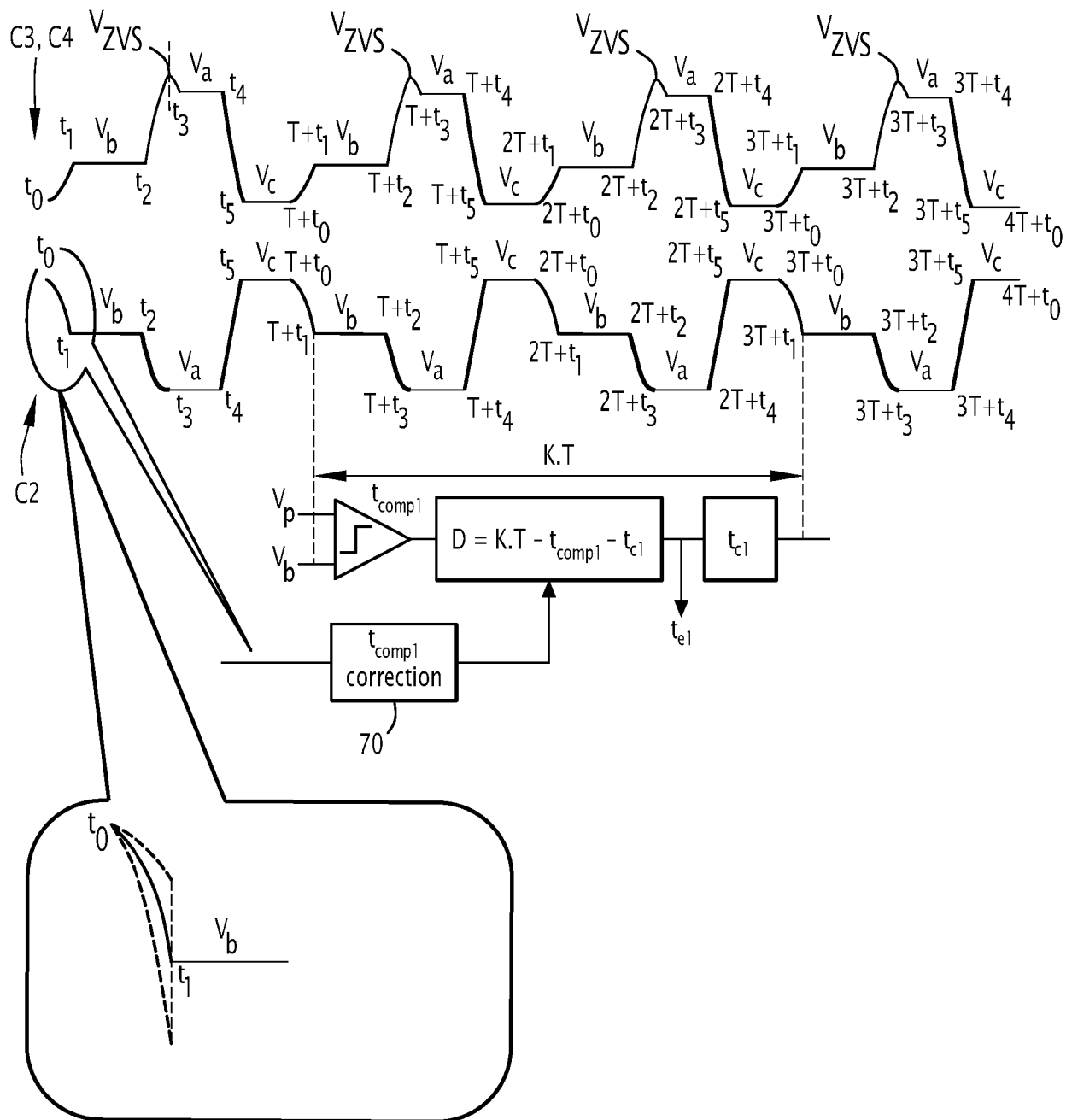


FIG.9

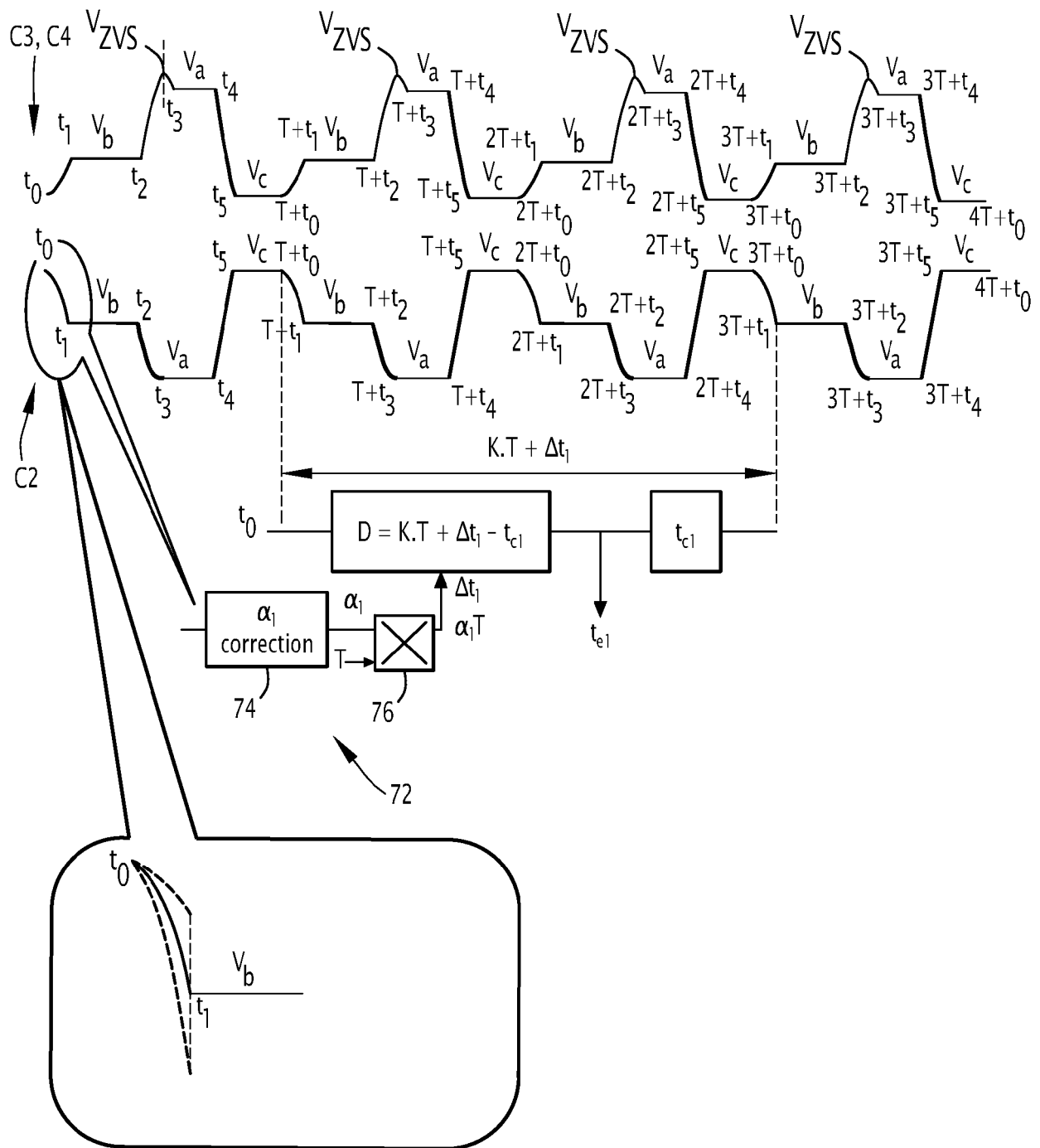


FIG.10

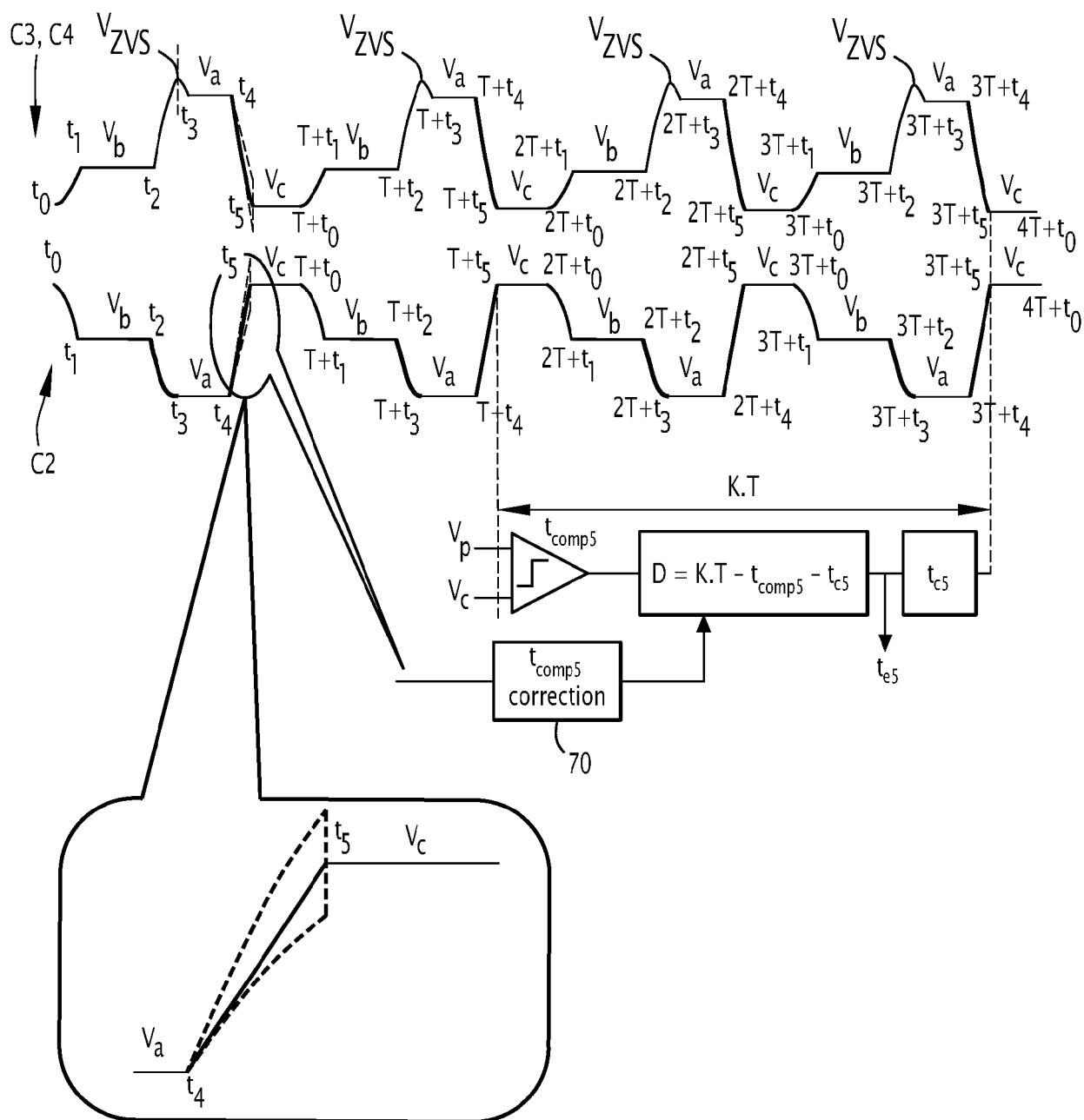


FIG.11

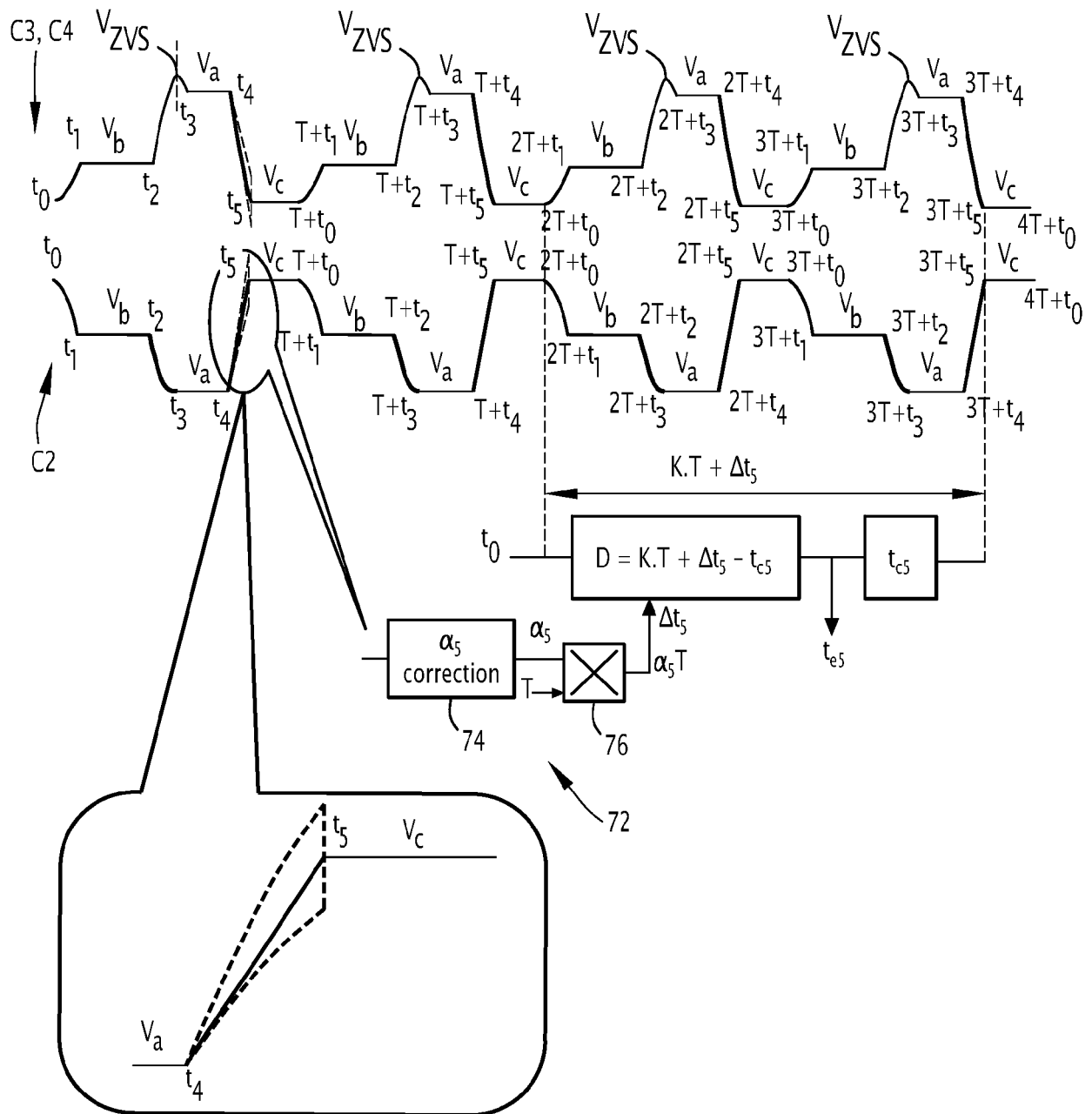


FIG.12

FIG.13

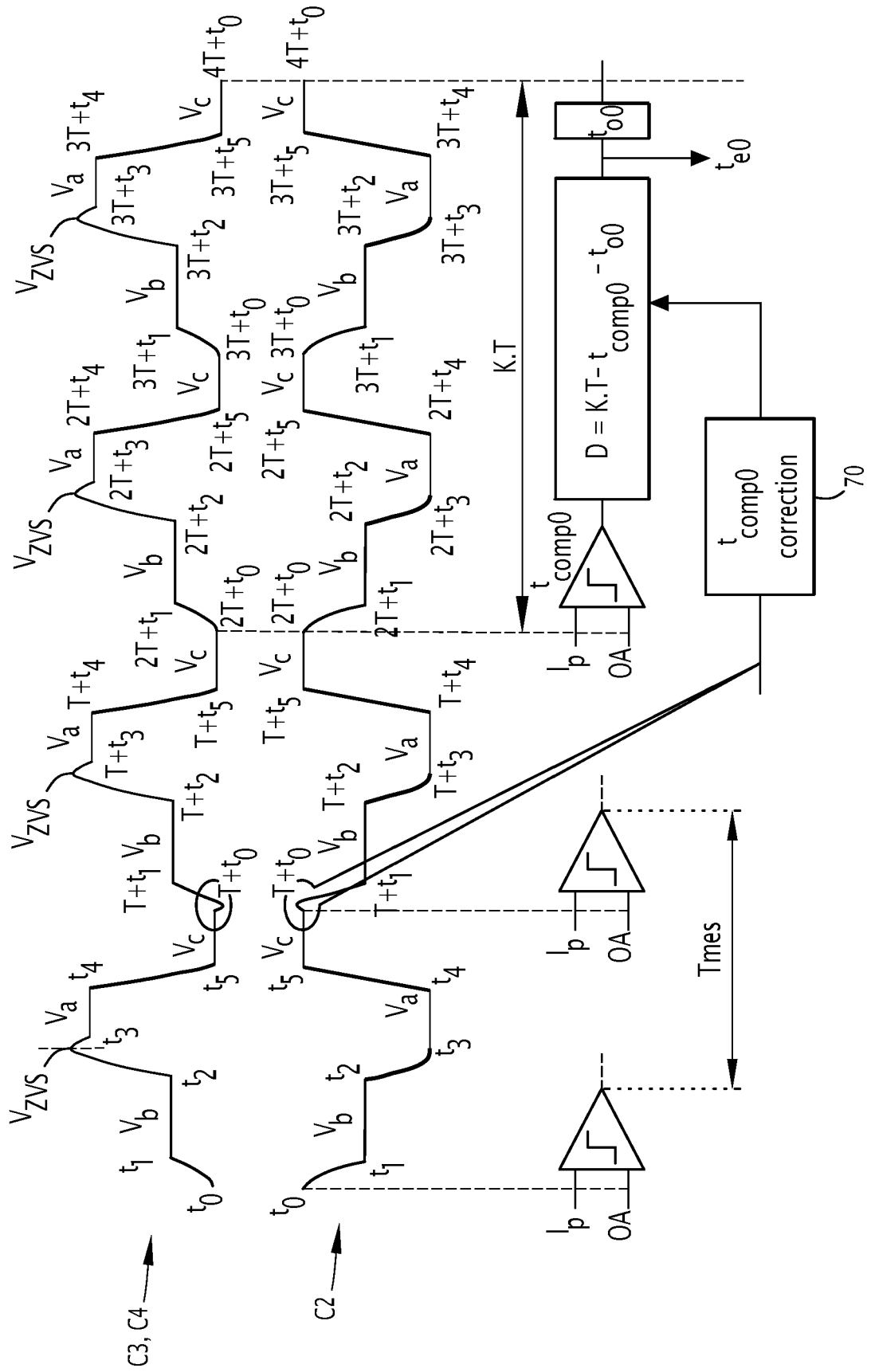
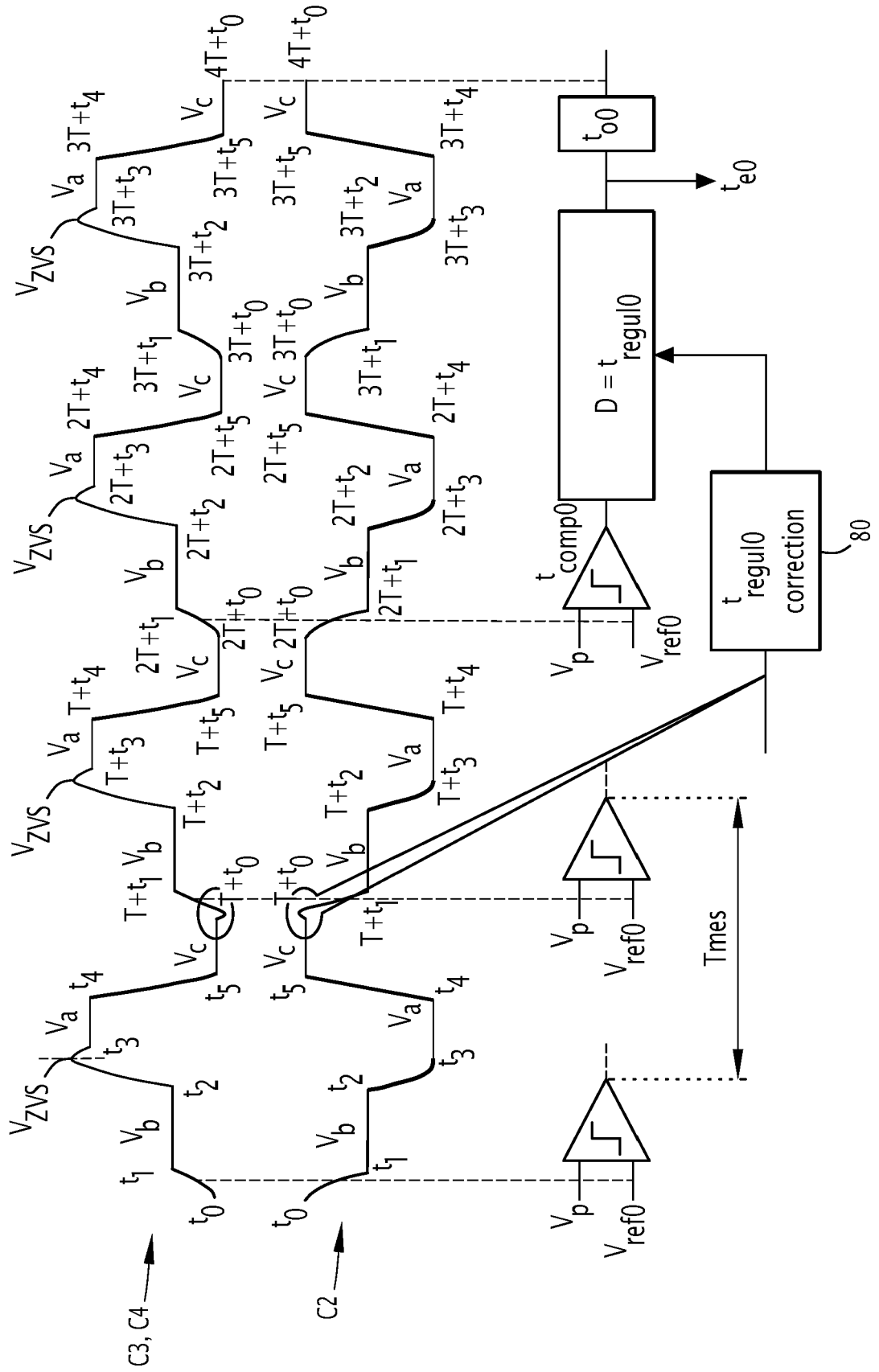


FIG.14



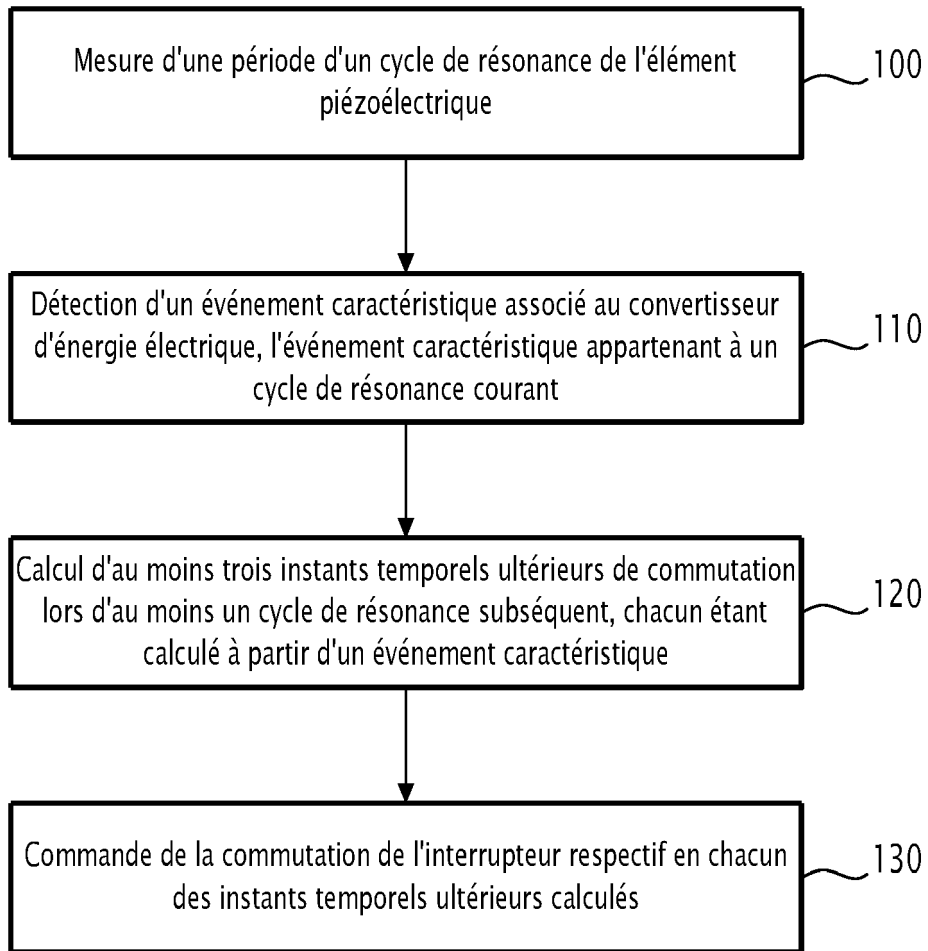


FIG.15



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 22 16 8939

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
X	Pollet Benjamin: "Convertisseurs DC-DC piézoélectrique avec stockage provisoire d'énergie sous forme mécanique", , 15 novembre 2019 (2019-11-15), pages 1-169, XP055862319, Extrait de l'Internet: URL:https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02415837/document [extrait le 2021-11-16]	1-7, 9-19	INV. H02M1/00 H02M3/00 H02M3/158
Y	* abrégé * * figures 2.1, 2.14, 2.15 * * page 56 - page 58 * * page 38 - page 41 * * partie 2.1.1.2 *	8	
Y	EP 3 382 875 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 3 octobre 2018 (2018-10-03) * abrégé * * figures 1-8 * * alinéa [0030] - alinéa [0098] *	1-19	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
Y	EP 3 451 519 A1 (NXP BV [NL]) 6 mars 2019 (2019-03-06) * abrégé * * figures 7-9 * * alinéa [0054] - alinéa [0074] *	1-19	H02M
Y	US 6 396 250 B1 (BRIDGE CHRISTOPHER DAVID [US]) 28 mai 2002 (2002-05-28) * abrégé * * figures 6-11 * * colonne 5, ligne 7 - colonne 8, ligne 55 *	1-19	
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche La Haye		Date d'achèvement de la recherche 9 août 2022	Examineur Adami, Salah-Eddine
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 22 16 8939

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
Y	US 2010/188873 A1 (ZHENG JUNJIE [US] ET AL) 29 juillet 2010 (2010-07-29) * abrégé * * figures 7, 8 * * alinéa [0013] - alinéa [0016] * * alinéa [0029] - alinéa [0040] * -----	8	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
La Haye		9 août 2022	Adami, Salah-Eddine
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

 1
 EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 22 16 8939

5 La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

09-08-2022

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 3382875 A1	03-10-2018	EP 3382875 A1	03-10-2018
		FR 3064850 A1	05-10-2018
		US 2018287503 A1	04-10-2018
EP 3451519 A1	06-03-2019	CN 109428471 A	05-03-2019
		EP 3451519 A1	06-03-2019
		US 10128766 B1	13-11-2018
US 6396250 B1	28-05-2002	AUCUN	
US 2010188873 A1	29-07-2010	US 7724547 B1	25-05-2010
		US 2010188873 A1	29-07-2010

EPO FORM P0460

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- FR 3064850 B1 [0004] [0144]
- FR 3086471 A1 [0004] [0021] [0144]
- FR 3086472 A1 [0004] [0021] [0144] [0145]